



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

**ZVÝŠENÍ ÚČINNOSTI JEDNOFÁZOVÉHO
ASYNCHRONNÍHO MOTORU**

EFFICIENCY IMPROVEMENT OF SINGLE-PHASE INDUCTION MOTOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michal Bořil

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

BRNO 2018

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Michal Bořil

ID: 182749

Ročník: 3

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Zvýšení účinnosti jednofázového asynchronního motoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s problematikou jednofázových asynchronních motorů a s výpočtem jejich parametrů.
2. Proveďte analytický výpočet a vytvořte model zadaného jednofázového motoru v programu Ansoft/RMxprt.
3. Navrhněte několik úprav zadaného motoru a analyzujte jejich vliv na jednotlivé druhy ztrát.
4. Vytvořte model v programu Ansys/Maxwell, výsledky vzájemně srovnajte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] BOLDEA, Ion and NASAR, Syed A. The Induction Machine Handbook. Boca Raton: CRC Press LLC, 2002. 949 p. ISBN 0-8493-0004-5.
- [2] ŠTĚPINA, Jaroslav. Jednofázové indukční motory. 1. vyd. Praha: SNTL, 1957. 200 s.
- [3] BRÁZDA, Miroslav a STAŇA, Rudolf. Výpočet asynchronního motoru. Brno: Výzkumný a vývojový ústav elektrických strojů točivých, 1973, 222 s.
- [4] PETROV, Georgij N. Elektrické stroje 2. Praha: Academia, 1982. 728 s.
- [5] KOPYLOV, I. P. Stavba elektrických strojů. 1. vyd. Praha: SNTL, 1988. 685 s.

Dále dle pokynu vedoucího práce.

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 28.5.2018

Vedoucí práce: doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tématem bakalářské práce je zvýšení účinnosti jednofázového asynchronního motoru. Práce je rozdělena na několik částí a obsahuje informace uvedené k tématu. V první části je uveden teoretický princip všech točivých strojů, od třífázových motorů až po jednofázové motory, kde je podrobně popsán princip, konstrukce a funkce těchto zařízení. Ve druhé části je analyticky navrhnout nový model motoru podle štítkových hodnot zadaného jednofázového asynchronního motoru a upraven tak, aby měl co nejlepší účinnost. Model motoru je vytvořen v programu ANSYS RMxpert a srovnán s modelem zadaného motoru, který je rovněž vytvořen podle parametrů z technické dokumentace ve stejném programu. V předposlední části bakalářské práce je vytvoření několik modelů s navrženými úpravami motoru pro zvýšení účinnosti a srovnáno se zadaným motorem. Tato část je zaměřena na analýzu jednotlivých druhů ztrát, které ovlivňují účinnost a výkon motoru. V poslední části bakalářské práce je v programu ANSYS Maxwell simulován model zadaného motoru a model motoru s nejvyšší účinností pomocí MKP. Získané informace modelů z programu Maxwell jsou porovnány s informacemi získané z programu RMxpert a vyhodnoceny.

Abstract

The subject-matter of the Bachelor Thesis is increasing efficiency of a single-phase asynchronous motor. The thesis is divided into several parts and comprises information concerning the subject-matter. The first part deals with the theoretical principle of all rotary machines from three-phase motors to single-phase motors, describing the principle, design and functionality of these devices in detail. In the second part, a new motor model is designed on the basis of the label values of a specified asynchronous motor and adapted to have the highest possible efficiency. The model of the motor is created in the ANSYS RMxpert program and compared to a model of the specified motor, which is also created on the basis of parameters of the technical documentation in the same program. In the last but one part of the Bachelor Theses, several models are created with proposed modifications of the motor to increase efficiency and compared to the specified motor. This part focuses on an analysis of individual types of losses that influence the efficiency and power of the motor. In the last part of the Bachelor Thesis, in the ANSYS Maxwell program, a model of the specified motor and a model of the motor with the highest efficiency is simulated with the use of FEMM. The obtained information of the models from the Maxwell program is compared to information obtained from the RMxpert program and evaluated.

Klíčová slova

Asynchronní motor, konstrukce, analytický výpočet parametrů a návrh motoru, konstrukční úpravy motoru, ztráty, zvýšení účinnosti, příkon a výkon motoru, simulace, program ANSYS RMxpert a ANSYS Maxwell, metoda konečných prvků

Keywords

Asynchronous motor, design, analytical parameter calculation and engine design, engine design, loss, efficiency gain, engine power and power, simulation, ANSYS RMxpert and ANSYS Maxwell, finite element method

Bibliografická citace:

BOŘIL, M. *Zvýšení účinnosti jednofázového asynchronního motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 92 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D..

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma Výpočet parametrů jednofázového asynchronního motoru jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujícího autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Ondřeji Vítkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

.....
podpis autora

Obsah

Úvod	2
1 Teorie asynchronní motorů	3
1.1 Definice	3
1.2 Dělení	3
1.3 Magnetický obvod	4
1.4 Magnetizační proud	5
1.5 Otáčky motoru a skluz	5
1.6 Momentová charakteristika a tok výkonů	6
2 Trojfázové motory	7
2.1 Vinutí trojfázového motoru	7
2.1.1 Jednovrstvá vinutí	7
2.1.2 Dvouvrstvá vinutí	8
2.2 Asynchronní motor naprázdno	8
2.3 Asynchronní motor při zatížení	9
2.4 Asynchronní motor při chodu nakrátko	9
2.5 Druhy klecových vinutí	10
2.5.1 Dvojitá klec	10
2.5.2 Vírová klec	11
2.5.3 Odporová klec	11
3 Jednofázové motory	12
3.1 Princip a vlastnosti	12
3.2 Náhradní schéma	12
3.3 Vinutí jednofázových motorů	13
3.3.1 Vinutí strojů s pomocným vinutím	13
3.3.2 Jednofázové a trojfázové vinutí	14
3.4 Způsoby zapojení jednofázových motorů	14
3.4.1 Spouštění jednofázových motorů	14
3.4.2 Spouštění s trvale připojeným kondenzátorem	15
3.5 Asynchronní motor se stíněnými póly	16
4 Analytický výpočet parametrů	17
4.1 Úvod	17
4.2 Analytický výpočet	17
4.3 ANSYS RMxpert	33
4.4 Srovnání navrhovaného a zadaného motoru	34
5 Možnosti zvýšení účinnosti jednofázového asynchronního motoru	39
5.1 Vzorek č. 1: Prodloužení magnetického obvodu	40

5.2	Vzorek č. 2: Změna velikosti průměru drátů hlavního a rozběhového vinutí.....	41
5.3	Vzorek č. 3: Změna velikosti průměru drátů hlavního a rozběhového vinutí, snížení počtu závitů.....	43
5.4	Vzorek č. 4: Změna druhu materiálu kruhů a tyčí.....	44
5.5	Vzorek č. 5: Změna šířky rotorového kruhu nakrátko, změna průměru drátů, snížení počtu závitů.....	46
5.6	Vzorek č. 6: Změna tvaru drážek, změna průměru drátů, snížení počtu závitů.....	48
5.7	Vzorek č. 7 a, b: Změna druhu materiálu plechů, změna průměru drátů, změna počtu závitů.....	51
5.8	Vzorek č. 8 a, b: Změna tvaru drážek, změna druhu materiálu plechů, změna průměru drátů, změna počtu závitů.....	53
5.9	Vzorek č. 9 Změna tvaru drážek, změna průměru drátů, snížení počtu závitů, šířka koncového kroužku, prodloužení magnetického obvodu.....	55
5.10	Vyhodnocení jednotlivých úprav.....	57
6	Vzájemné srovnané výsledky.....	61
6.1	ANSYS Maxwell.....	61
6.1.1	Metoda konečných prvků.....	62
6.1.2	Vytvoření 2D modelu.....	62
6.2	Srovnání simulací zadaného motoru.....	63
6.3	Srovnání simulací vzorku s nejvyšší účinností.....	64
	Závěr.....	66
	Literatura.....	68
	Seznam symbolů, veličin a zkratk.....	69
	Seznam příloh.....	71

Seznam obrázků

Obr. 1. Průchod magnetického toku asynchronního motoru [3]	4
Obr. 2. Tok výkonu v asynchronním motoru [4]	6
Obr. 3. Momentová charakteristika asynchronního motoru [4]	6
Obr. 4. Činitel vinutí pro tři fáze [3]	7
Obr. 5. Náhradní schéma asynchronního motoru naprázdno	8
Obr. 6. Náhradní schéma asynchronního motoru při zatížení	9
Obr. 7. Náhradní schéma asynchronního motoru při chodu nakrátko	10
Obr. 8. Uspořádání drážek a momentová charakteristika dvojité klece [4]	10
Obr. 9. Uspořádání drážek virové klece	11
Obr. 10. Trojfázové vinutí přepojené pro jednofázový chod [3]	12
Obr. 11. Náhradní schéma jednofázového asynchronního motoru	13
Obr. 12. Schéma zapojení motoru s trvale připojeným kondenzátorem [6]	15
Obr. 13. Asynchronní motor se stíněnými póly [4]	16
Obr. 14. Momentová charakteristika motoru se stíněnými póly [4]	16
Obr. 15. Tvar drážky [3]	22
Obr. 16. Rozměry statorové drážky [3]	24
Obr. 17. Grafické určení kapacity rozběhového kondenzátoru	30
Obr. 18. Uživatelské rozhraní programu ANSYS RMxpert	33
Obr. 19. Závislost účinnosti na výstupním výkonu motoru A	35
Obr. 20. Porovnání účinnosti zadaného motoru a vzorku č. 1 – závislost účinnosti na výkonu	40
Obr. 21. Porovnání účinnosti zadaného motoru a vzorku č. 2 – závislost účinnosti na výkonu	41
Obr. 22. Porovnání účinnosti zadaného motoru a vzorku č. 3 – závislost účinnosti na výkonu	43
Obr. 23. Porovnání účinnosti zadaného motoru a vzorku č. 4(1, 2) – závislost účinnosti na výkonu	44
Obr. 24. Koncový kroužek rotoru	46
Obr. 25. Porovnání účinnosti zadaného motoru a vzorku č. 5 – závislost účinnosti na výkonu	46
Obr. 26. Původního tvar (vpravo) drážky statoru zadaného motoru a optimalizovaný tvar (vlevo) drážky statoru vzorku č. 6	48
Obr. 27. Původního tvar (vpravo) drážky rotoru zadaného motoru a optimalizovaný tvar (vlevo) drážky rotoru vzorku č. 6	49
Obr. 28. Porovnání účinnosti zadaného motoru a vzorku č. 6 – závislost účinnosti na výkonu	50
Obr. 29. Porovnání BH křivek plechů M800-50 A, M400-50 A a M235-35 A	51

Obr. 30. Porovnání účinnosti zadaného motoru a vzorku č. 7(a, b) – závislost účinnosti na výkonu	52
Obr. 31. Porovnání účinnosti zadaného motoru a vzorku č. 8(a, b) – závislost účinnosti na výkonu	53
Obr. 32. Porovnání účinnosti zadaného motoru a vzorku č. 6 – závislost účinnosti na výkonu	55
Obr. 33. Uživatelské rozhraní ANSYS Maxwell.....	61
Obr. 34. <i>BH</i> -křivka plechů M800-50 A v prostředí RMxpert	63
Obr. 35. Časový průběh momentu zadaného motoru v ANSYS Maxwell	64
Obr. 36. Časový průběh ztrát vzorku s nejvyšší účinností.....	65
Obr. 37. Závislost proudu na otáčkách motoru A.....	77
Obr. 38. Závislost účinnosti na otáčkách motoru A	77
Obr. 39. Závislost výkonu na otáčkách motoru A	77
Obr. 40. Závislost účinníku na otáčkách motoru A	78
Obr. 41. Momentová charakteristika motoru A.....	78
Obr. 42. Závislost proudu na otáčkách motoru B.....	84
Obr. 43. Závislost účinnosti na otáčkách motoru B.....	84
Obr. 44. Závislost výkonu na otáčkách motoru B.....	84
Obr. 45. Závislost účinníku na otáčkách motoru B	85
Obr. 46. Momentová charakteristika motoru B.....	85
Obr. 47. Závislost proudu na otáčkách motoru C.....	91
Obr. 48. Závislost účinnosti na otáčkách motoru C.....	91
Obr. 49. Závislost výkonu na otáčkách motoru C.....	91
Obr. 50. Závislost účinníku na otáčkách motoru C.....	92
Obr. 51. Momentová charakteristika motoru C	92

Seznam tabulek

Tab. 1. Srovnání odporů rozběhového a hlavního vinutí	32
Tab. 2. Srovnání parametrů navrženého, navrženého upraveného a zadaného motoru	36
Tab. 3. Srovnání jednotlivých druhů ztrát vzorku č. 1 se zadaným motorem	40
Tab. 4. Srovnání jednotlivých druhů ztrát vzorku č. 2 se zadaným motorem	42
Tab. 5. Srovnání jednotlivých druhů ztrát vzorku č. 3 se zadaným motorem	43
Tab. 6. Srovnání jednotlivých druhů ztrát vzorku č. 4 se zadaným motorem	45
Tab. 7. Srovnání jednotlivých druhů ztrát vzorku č. 5 se zadaným motorem	47
Tab. 8. Srovnání rozměrů statorové a rotorové drážky	49
Tab. 9. Srovnání jednotlivých druhů ztrát vzorku č. 6 se zadaným motorem	50
Tab. 10. Srovnání jednotlivých druhů ztrát vzorku č. 7 a, b se zadaným motorem	52
Tab. 11. Srovnání jednotlivých druhů ztrát vzorku č. 8 a, b se zadaným motorem	54
Tab. 12. Srovnání jednotlivých druhů ztrát vzorku č. 9 se zadaným motorem	56
Tab. 13. Parametry vzorků č. 1 – č. 3	58
Tab. 14. Parametry vzorků č. 4 – č. 7 a	59
Tab. 15. Parametry vzorků č. 7 b – č. 9	60
Tab. 16. Srovnání výsledků simulací zadaného motoru	63
Tab. 17. Srovnání výsledků simulací vzorku s nejvyšší účinností	65

ÚVOD

Elektrické stroje jsou v dnešní době v průmyslu zcela běžná věc. Jejich využití ulehčuje život lidí a práci ve výrobních podnicích, ať už se jedná o výrobu elektrické energie pomocí generátorů nebo o výrobu mechanické energie pomocí motorů a dalších zařízení. Elektrické stroje můžeme třídit podle působení (transformátory, asynchronní, stejnosměrné a synchronní), výkonu (drobné, malé, střední, velké) nebo podle frekvence otáčení. Hlavní částí elektrických strojů je magnetický obvod, vinutí a izolace vodičů. Všechny části jsou důležité pro správný chod celého stroje a každá část splňuje dílčí požadavky.

Asynchronní stroje patří mezi nejrozšířenější střídavé elektrické stroje. Tyto stroje se většinou používají jako motory. Asynchronní motory mohou mít různé provedení podle počtu fází anebo podle jiných konstrukčních požadavků. Pracují na principu elektromagnetické indukce. Energie se z vinutí statoru přenáší přes vzduchovou mezeru na vinutí rotoru (kotvy) jen elektromagnetickou indukcí, bez vodivého spojení, a proto se také mohou nazývat jako indukční stroje. Motory se vyrábí v širokém rozsahu od desítek W do tisíce kW.

Jednofázové asynchronní motory mají podobné konstrukční uspořádání jako trojfázové asynchronní motory. Rozdíl mezi těmito motory je ve vinutí a v rozběhovém zařízení. Vinutí statoru je rozloženo nejčastěji na dvě třetiny statorových drážek a rozběhové vinutí zaplňuje zbývající jednu třetinu. Pomocné vinutí může být buď odporové nebo častěji používané kapacitní. Jednofázový motor může mít také trojfázové vinutí, tak že se dvě fáze spojí paralelně a zbývající třetí fáze se použije jako rozběhové vinutí.

Výhodou těchto motorů jsou nízké pořizovací náklady a jejich jednoduchost. Jsou provozně nespolehlivější a vyžadují malou údržbu. Nevýhodou těchto motorů je používání na malé výkony. Užívají se k pohonům zařízení jako jsou čerpadla, ventilátory, kompresory, pásové dopravníky, jeřáby, výtahy apod.

1 TEORIE ASYNCHRONNÍ MOTORŮ

1.1 Definice

Asynchronní (indukční) stroj je elektrický točivý stroj, který je založen na elektromagnetické indukci. Magnetický obvod je rozdělen vzduchovou mezerou na stator a rotor. Obě části jsou opatřeny vinutím. Indukční stroje mají budící vinutí z mědi ve statoru a v rotoru je kotva spojená nakrátko. Stator může mít buď třífázové nebo jednofázové vinutí. Kotva neboli klec je spojena vždy nakrátko. Jsou to nejrozšířenější elektrické stroje a nejpoužívanější. Používají se ve všech průmyslových odvětvích [1] [2].

1.2 Dělení

Indukční stroje se dělí podle různých požadavků a dělíme je [1]:

Podle počtu fází

- Jednofázové – motory se používají pro pohony zařízení malých výkonů. Patří mezi ně např.: ventilátory, pračky, ledničky atd.
- Dvofázové – používají se v servomechanismech, které dosáhnou výkonu do 100 W.
- Trojfázové

Podle rotorového vinutí dělíme na

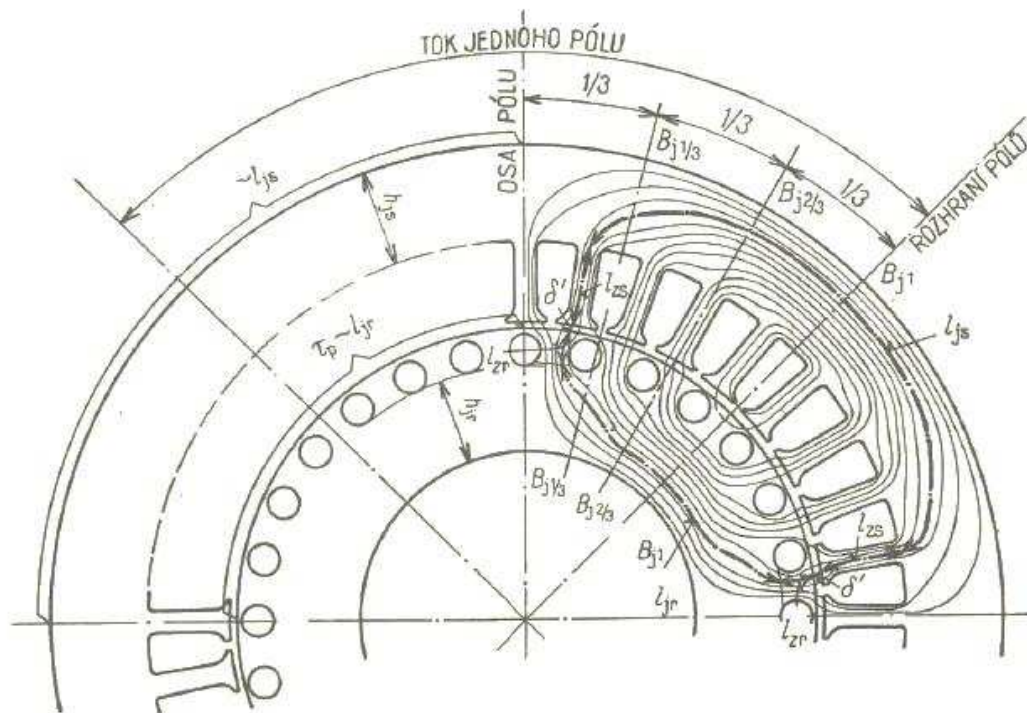
- Kroužkové – V drážkách rotoru je trojfázové vinutí z mědi, které je zapojené do hvězdy nebo trojúhelníka. Vývody vinutí jsou připojeny na tři kroužky, které jsou nalisované na hřídeli rotoru. Na kroužky dosedají pevně osazené kartáče, přes které je vyvedeno vinutí na svorkovnici stroje.
- S kotvou nakrátko – V drážkách rotoru jsou uloženy vodivé tyče, které jsou mosazné, měděné a nejčastěji hliníkové, které jsou na obou koncích spojené zkratovacími kruhy nakrátko.

Podle principu výroby energie dělíme na

- Asynchronní motor – Přivedením elektrické energie na stator se mění elektrická energie na mechanickou energii rotoru pomocí elektromagnetické indukce.
- Asynchronní generátor – Přivedením mechanické energie na rotor dochází k přeměně na elektrickou energii, která je odebíraná z vinutí statoru. Asynchronní generátor se používá jen výjimečně.
- Indukční měnič kmitočtu
- Indukční brzda

1.3 Magnetický obvod

Sťator je složený z drážek, které jsou na vnitřním obvodu. Rotor má drážky uložené ve vnějším obvodu. Magnetický tok prochází přes sťatorové zuby, dále projde přes vzduchovou mezeru do zubů rotoru, obrátí se jhem rotoru, přes zuby a zpátky vzduchovou mezerou. Magnetický tok uzavírá obvod tak, že projde přes zuby sťatoru a zpět do jha sťatoru. Průběh magnetického toku přes zuby rotoru a sťatoru je na obr. 1 [3].



Obr. 1. Průchod magnetického toku asynchronního motoru [3]

Točivý moment asynchronního motoru vzniká vzájemným působením točivého magnetického pole, které se skládá z více magnetických polí, které jsou vzájemně prostorově i časově posunuté a z magnetického pole rotoru. Točivé magnetické pole můžeme vytvořit třemi cívkami, které musí být pootočené o 120° a jsou napájeny třífázovým proudem. Po přivedení proudu na cívky se mění velikost proudu podle sinusovky od kladného maxima, přes nulu do záporného maxima

a zpět do nuly. Ve všech cívkách měnící proudy vytvoří magnetické toky, které se také mění podle sinusovky s časem. Pokud je permeabilita prostředí konstantní, můžeme říci, že hodnota toků je přímo úměrná okamžitým hodnotám proudů. Magnetické pole vybuzené cívkami se s časem nemění. Magnetický tok, který se

nepodílí na přeměně energie, se nazývá rozptylový tok. Stroj se co nejlépe využije, když je rozptyl co nejmenší [1][3].

1.4 Magnetizační proud

Magnetizační proud vytváří magnetomotorické napětí, které je součtem všech magnetických napětí. Slouží k tomu, aby magnetickým obvodem procházel magnetický tok. Magnetomotorické napětí nezávisí na nasycení magnetického obvodu, ale je závislé na proudu, a proto při změně proudu v drážkách se mění magnetické pole [1]. Magnetomotorické napětí je dáno vztahem:

$$F = I \cdot N, \quad (1.1)$$

kde I je magnetizační proud a N počet závitů.

1.5 Otáčky motoru a skluz

Přivedením napětí na svorky motoru se vytvoří proud na statoru, který indukuje ve vinutí rotoru zase proud a způsobí vznik točivého magnetického pole. Pokud se rotor roztočí na synchronní otáčky a otáčel by se souhlasně s točivým magnetickým polem, tak by vodiče rotoru neprotínali žádné indukční čáry a neindukoval by se proud, tím by točivý moment byl nulový a otáčel by se jen setrvačností. Rotor musí zpomalit a indukční čáry začnou protínat vodiče a s rostoucím zatížením se otáčky motoru zmenšují. Otáčky rotoru asynchronního motoru jsou vždy menší než otáčky točivého pole. Rotor nikdy nevykoná otáčku současně s točivým polem, nýbrž se bude otáčet za jinou dobu tedy asynchronně, a proto se tyto stroje nazývají asynchronní. Poměrný rozdíl mezi synchronními otáčkami točivého magnetického pole a otáčkami rotoru se nazývá skluz. Jmenovitý skluz bývá v rozmezí 1 až 10 %. Malé motory mají větší skluz než velké motory [1][2]. Skluz je dán vztahem:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}, \quad (1.2)$$

kde n_1 jsou synchronní otáčky a n jsou otáčky rotoru.

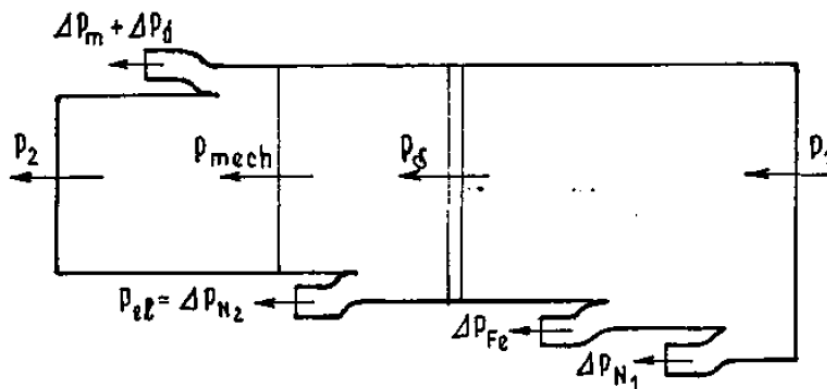
Synchronní otáčky točivého magnetického pole závisí na kmitočtu zdroje, ze kterého je motor napájen. Točivé magnetické pole má $2p$ pólů, kde p je počet pólových dvojic (sever a jih). Motor dosahuje různých synchronních otáček, které závisí na počtu pólových dvojic. Magnetické pole vykoná za jeden kmit jednu otáčku (dvoupólový motor), která odpovídá dvěma pólovým roztečím. Pólová rozteč je vzdálenost os dvou sousedních pólů [2]. Synchronní otáčky se počítají:

$$n_1 = \frac{60 \cdot f}{p}, \quad (1.3)$$

kde f je síťový kmitočet a p je počet pólových dvojic.

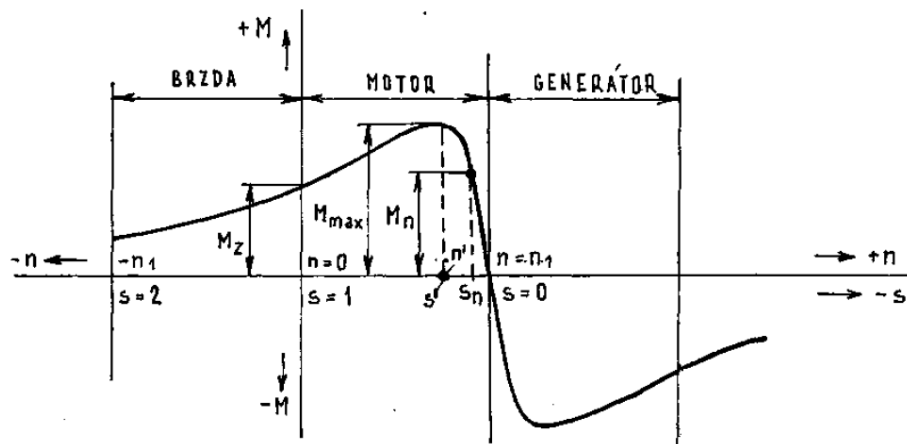
1.6 Momentová charakteristika a tok výkonů

Po přivedení příkonu na stator motoru, vychází z motoru výkon. Příkon je vždy větší než výkon, protože na motoru existují různé ztráty, které zmenšují hodnotu příkonu. Příkon, který vstupuje na stator, se skládá z činných (Joulových) ztrát ve vinutí statoru a ztrát v magnetickém obvodu motoru. Hlavní část příkonu prochází přes vzduchovou mezeru do rotoru. Na rotoru se objevují činné ztráty ve vinutí rotoru a vytváří se mechanický výkon stroje. Na hřídeli se objevuje mechanický výkon, který je menší o mechanické ztráty a ztráty dodatečné [3].



Obr. 2. Tok výkonu v asynchronním motoru [4]

Při jmenovitém zatížení motor vytvoří mechanický moment. Maximální moment dostaneme, jestliže skluz motoru odpovídá skluzu zvratu a při chodu nakrátko vykazuje záběrný moment. Pokud otáčky motoru překonají synchronní otáčky, stroj už nebude pracovat jako motor, ale bude pracovat jako generátor. Při chodu naprázdno je účinník motoru velmi malý. Nezatížený motor odebírá ze sítě pouze jalový výkon, který je nutný pro vytvoření magnetického pole a malý zanedbatelný činný výkon pro krytí ztrát naprázdno [4].

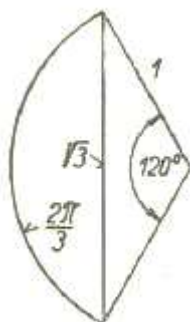


Obr. 3. Momentová charakteristika asynchronního motoru [4]

2 TROJFÁZOVÉ MOTORY

2.1 Vinutí trojfázového motoru

Vinutí trojfázového motoru je uloženo v drážkách a každé fázi přísluší jedna třetina všech drážek. Každé vinutí je cívka, která obsahuje určitý počet závitů a nazývá se závitové vinutí. Cívka se skládá ze dvou stran, které jsou uloženy v drážkách a dvou čel, kterými jsou vodiče cívkových stran uzavřeny v závity. Může také být jeden závit na cívce, která se nazývá tyčové vinutí. Účinnost vinutí pro indukované napětí je vyjádřena činitelem vinutí. Čím větší je činitel vinutí, tím lepší je využití motoru. Vinutí slouží k vybuzení magnetického točivého pole s určitým počtem pólů, které určují otáčky rotoru. Pro tři fáze je středový úhel 120° [3][4].



Obr. 4. Činitel vinutí pro tři fáze [3]

Vinutí je dáno počtem drážek na pól a fázi. Nejjednodušší vinutí je vinutí s šesti drážkami, z čehož vyplývá 1 drážka na pól a fázi. Celkový počet drážek je dán následujícím vztahem:

$$S = 6 \cdot p \cdot q, \quad (2.1)$$

kde p je počet pólových dvojic a q je počet drážek.

2.1.1 Jednovrstvá vinutí

Jednovrstvé vinutí je nejjednodušší vinutí, které se může nakreslit. Toto nejjednodušší vinutí má na pól a fázi jednu drážku a 3 pólové rozteče. Jednovrstvé vinutí je nejrozšířenější u indukčních motorů a používá se na malé výkony, protože mají levné provedení šablonových vinutí, a to umožňuje jejich sériovou výrobu. Cívky jsou vyrobeny předem a pak se navinuté vkládají drát po drátě do drážek [2].

2.1.2 Dvouvrstvá vinutí

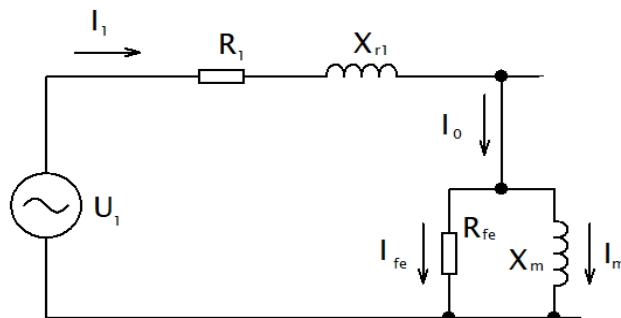
V předešlé kapitole bylo pojednáváno o jednovrstvém vinutí a z toho vyplývá, že se používají, častěji než u tohoto vinutí. Jednovrstvá vinutí mají velký diferenční rozptýl. U dvouvrstevných vinutí se vyskytují v každé drážce dvě cívkové strany. U těchto vinutí je počet všech cívek roven počtu drážek, a tedy dvakrát větší počet drážek než u jednovrstevných vinutí. Všechny fáze uložené v drážkách musí být důkladně izolovány.

Větší počet cívek vede k důkladnější izolaci a mezi čely zvětšuje pracnost dvouvrstevného vinutí. Magnetické pole vybuzené tímto vinutím zlepšuje průběh motoru. Výhodou vinutí je, že při zkráceném kroku vycházejí kratší čela cívek, a tím pádem se na výrobu spotřebuje menší množství mědi. Když se zkrátí čelo, zkrátí se i vyložení čel, což zmenší i délku stroje. Použitím menšího množství mědi se zmenší i Jouleovy ztráty. Dvouvrstvé vinutí se pozná podle vnitřního obvodu, protože čela cívek jsou formována jedním směrem a na vnějším obvodu obráceně [1].

2.2 Asynchronní motor naprázdno

Při zavedení proudu do statorového vinutí vzniká točivé magnetické pole, které indukuje v rotoru trojfázový proud, který také vytvoří točivé magnetické pole. Vzájemným přitahováním magnetických polí se začne rotor otáčet. Rotor se otáčí menší než synchronní rychlostí, tedy rychlostí menší, o tzv. skluz. Tento případ uvažujeme při mechanickém zatížení rotoru. Menší otáčky způsobuje tření v ložiskách, vzduch a ztráty v železe [2].

Při chodu naprázdno neboli bez mechanického zatížení, rotor se otáčí téměř synchronní rychlostí, a tedy se neindukuje ve vodičích žádné napětí a proud. Točivý moment motorů je nulový. Elektricky se asynchronní motor naprázdno chová jako transformátor. Proud motoru je větší s porovnáním proudu transformátoru, protože magnetický tok prochází dvěma vzduchovými mezerami, které mají velký magnetický odpor. Proud naprázdno závisí na počtu pólů a velikosti motoru [1].

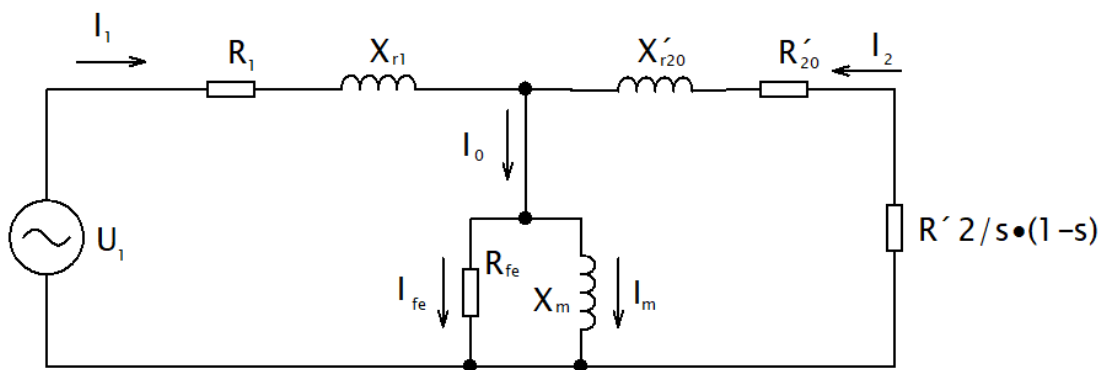


Obr. 5. Náhradní schéma asynchronního motoru naprázdno

2.3 Asynchronní motor při zatížení

V přechodí kapitole, jak již bylo zmíněno, motor při zatížení má menší otáčky a rotor začne zaostávat za točivým magnetickým polem, v jehož vinutí se vytvoří napětí, které je potřebné k průchodu proudu rotorovým odporem vinutí. Čím vyšší je zatížení na hřídeli rotoru, tím více se otáčky rotoru zmenšují. Při větším rotorovém napětí roste velikost skluzu. Pro stojící rotor jsou otáčky nulové a napětí má nejvyšší hodnotu. Při chodu naprázdno má rotor synchronní otáčky, ale skluz a napětí jsou nulové.

U asynchronních motorů se uvažuje také rozptyl magnetického toku. Rozptyl magnetického toku je část magnetického toku, která neprochází vzduchovou mezerou, ale uzavírá se nakrátko kolem statorového a rotorového vinutí. Rozptyl dělíme na dvě části. Část magnetického toku prochází rozptylovými cestami kolem statorového vinutí a druhá část prochází rozptylovými cestami kolem rotorového vinutí. Rozptylový tok se s rostoucím zatížením zvyšuje, protože jsou buzeny rotorové a statorové proudy, které se také mění se zatížením. Magnetický tok je ve vzduchové mezeře při každém zatížení různý a pokaždé se ve vinutí indukuje jiné napětí. Rozptylové toky se většinou nahrazují rozptylovými reaktancemi a rozptylová reaktance statoru je stejná, protože závisí na síťovém kmitočtu na rozdíl od reaktance rotorového vinutí, kde se frekvence mění. Na obr. 6 je náhradní schéma motoru při zatížení, kde rotorové hodnoty jsou přepočítány na stator a odpor $\frac{R'_2}{s} \cdot (1 - s)$ je fiktivní odpor, který reprezentuje elektrický výkon, který se přemění na mechanický výkon [1][4].

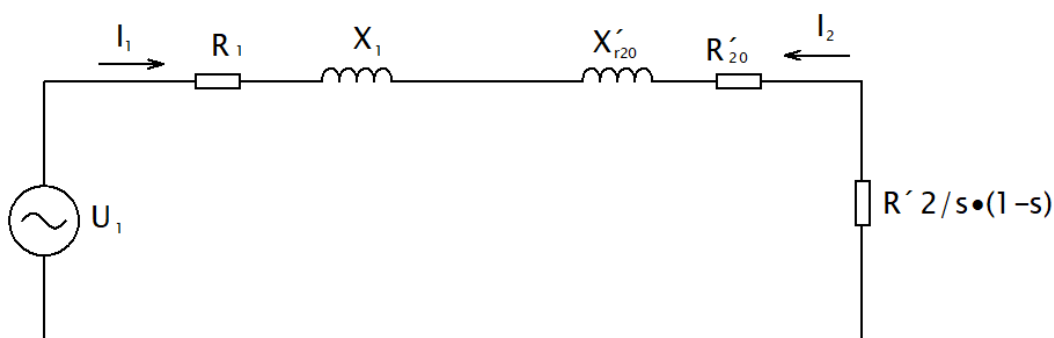


Obr. 6. Náhradní schéma asynchronního motoru při zatížení

2.4 Asynchronní motor při chodu nakrátko

Indukční motor pracuje nakrátko, když jeho rotor stojí. Nastává tedy při rozběhu, v okamžiku připojení na síť nebo při zastavení, když se motor přetíží. Vodiče na rotoru jsou točivým magnetickým polem protínány synchronními otáčkami a indukuje se v nich velký zkratový proud. Proud nakrátko lze určit

ze zjednodušeného náhradního schématu, kde proud I_0 je malý, až zanedbatelný, ve kterém se vynechává magnetizační reaktance a ztráty v železe [4].



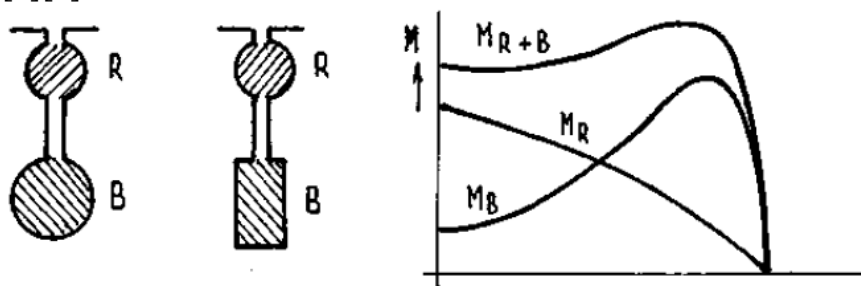
Obr. 7. Náhradní schéma asynchronního motoru při chodu nakrátko

Oproti transformátorům je vodivost rozptylových cest při porovnání s vodivostí hlavního magnetického obvodu se vzduchovou mezerou větší, takže reaktance motoru je větší a zkratový proud menší. Indukované napětí v rotorovém vinutí je při chodu nakrátko malé, protože při nulovém zatěžovacím odporu prochází proud velmi malým odporem rotorového vinutí. Všechn magnetický tok zůstane na statoru [1].

2.5 Druhy klecových vinutí

2.5.1 Dvojitá klec

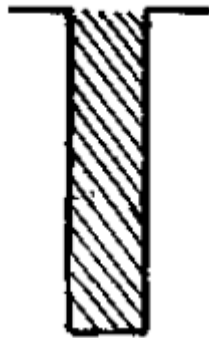
Dvojitá klec má dvě soustavy tyčí nestejného průřezu, které jsou pod sebou. Všechny tyče v kleci jsou spojené vodivými kruhy. Horní klec se nazývá rozběhová, která má větší odpor než dolní běhová klec. Myšlenkou zhotovení této klece bylo, aby tento motor spojoval výhody odporové klece při rozběhu a jednoduché klece při normálním chodu. Tato klec dosáhne většího záběrného momentu a zmenšení záběrného proudu. Vlastnosti motoru s dvojitou klecí jsou za normálního chodu trochu horší než vlastnosti motoru s jednoduchou klecí. Točivé momenty rozběhové a běhové klece se na hřídeli sčítají a dohromady dávají výsledný moment [1][4].



Obr. 8. Uspořádání drážek a momentová charakteristika dvojité klece [4]

2.5.2 Vírová klec

Vírová klec má svoje tyče uloženy v úzkých a hlubokých drážkách. Pomocí vírové klece dosáhneme většího záběrného momentu a zmenšení záběrného proudu, podobně jako u dvojité klece. Spodní vlákna vysoké tyče jsou spřažena s vyšším rozptylový magnetickým tokem než horní vlákna. Při rozběhu dolní vlákna tyče mají větší reaktanci a proud se z nich vytlačuje do horních vláken. Proud prochází menším průřezem, klec se chová jako odporová a při chodu se proud rozdělí rovnoměrně po celém průřezu. Touto klecí nelze dosáhnout takových kombinací momentových charakteristik a zvětšení záběrného momentu jako u předchozí klece. Oproti tomu jsou jednodušší a oblíbenější. Motory s vírovou klecí se používají pro větší výkony, vysoká napětí a menší záběrné momenty. Zúžená horní část má zvětšit činný odpor na rozběhu [1].



Obr. 9. Uspořádání drážek virové klece

2.5.3 Odporová klec

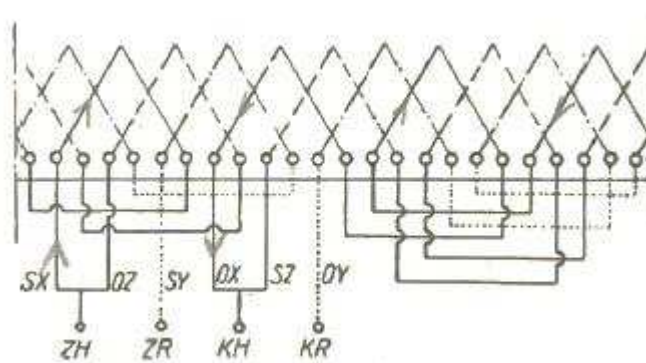
Odporová klec má všechny svoje části z materiálu o velkém měrném odporu, které jsou zhotovené z mosazi, siluminu apod. Většímu odporu odpovídá větší záběrný moment, větší skluz a současně horší účinnost motoru. Tyto klece se nejčastěji používají u jeřábů a motorů, kde je potřeba velký záběrný moment a není důležitá zhoršená účinnost. Vhodným odporem klece se dosáhne toho, že záběrný moment se může rovnat momentu maximálnímu [1].

3 JEDNOFÁZOVÉ MOTORY

3.1 Princip a vlastnosti

Jednofázový indukční motor se nejčastěji používá k pohonu malých spotřebičů. Tyto motory se používají nejčastěji v domácnostech, jako třeba v pračkách, ledničkách, ventilátorech apod. Stator je drážkovaný a rotor tohoto motoru má obvykle klecové vinutí. Motory se po připojení k jednofázové síti nerozběhnou, neboť napětí vytvoří jenom pulzující střídavé magnetické pole, které nezpůsobí točivý moment. Motor se začne otáčet jedině, kdy ho roztočíme alespoň na 20 % synchronních otáček. Proto tyto motory mají většinou pomocné vinutí, do kterého se zapojuje kondenzátor nebo odpor. Hlavní vinutí zaplňuje většinou dvě třetiny statorových drážek a rozběhové vinutí má zbývající jednu třetinu. Dá se říci, že tyto motory se rozbíhají jako dvoufázové [1].

Jednofázový motor může mít také trojfázové vinutí. Dvě fáze se spojí paralelně, které vytvoří hlavní vinutí a třetí fáze se použije jako rozběhové vinutí. Následně se zapojí kondenzátor nebo odpor. U malých jednofázových motorů se dělají nestejně hluboké drážky, do kterých se vkládá nestejný počet vodičů. Nestejný počet vodičů se vkládá proto, aby se lépe využilo železo. Jednofázový motor se navrhuje jako třífázový většího výkonu, kde jsou využity jen dvě třetiny obvodu stroje, které vede ke zvětšení výkonu až o 50 % [3].

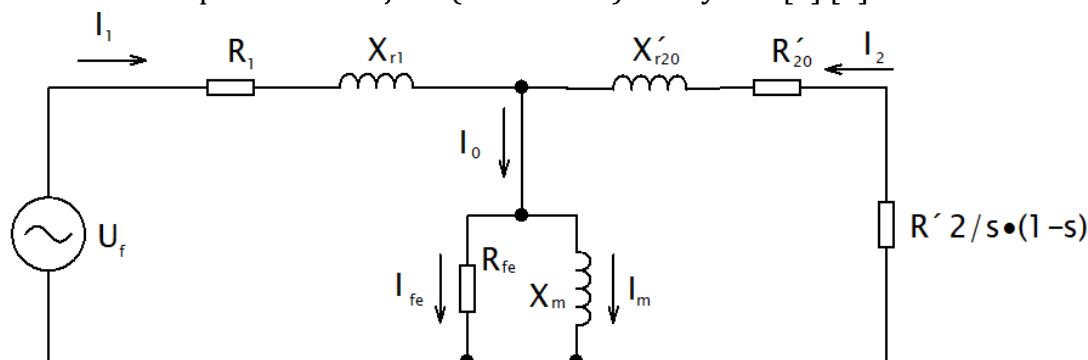


Obr. 10. Trojfázové vinutí přepojené pro jednofázový chod [3]

3.2 Náhradní schéma

Náhradní schéma jednofázového asynchronního motoru znázorňuje elektrické poměry ve stroji a je dáno rovnicemi stroje. Na obr. 9 je náhradní schéma indukčního motoru, které znázorňuje vztah mezi fázovými hodnotami proudů a napětí, které je stejné jako náhradní schéma třífázového indukčního motoru.

Rozdíl mezi třífázovým a jednofázovým motorem je v napětí, kdy jednofázový motor je napájen fázovým napětím. Pomocí náhradních schémat mohou být určeny při různých poměrových parametrech (skluzech) proudy, účinníky, různé ztráty a točivý moment. U jednofázových motorů se můžou měnit parametry náhradního schématu vlivem povrchového jevu (skin efektu) a nasycení [5] [6].



Obr. 11. Náhradní schéma jednofázového asynchronního motoru

3.3 Vinutí jednofázových motorů

3.3.1 Vinutí strojů s pomocným vinutím

U motorů, kde se neuvažuje pomocné vinutí, se obvykle používá vinutí soustředné, které vyplňuje dvě třetiny všech drážek. Výhodou těchto vinutí je, že nevyvolávají třetí harmonickou magnetomotorické síly. Zbývající jedna třetina drážek zůstává volná, nebo se zaplňuje pomocným vinutím.

Pro dosažení hladké momentové charakteristiky s odporovým rozběhem se často používá sinusově rozložených závitů obou vinutí. U tohoto rozběhu leží obě vinutí jak hlavní, tak pomocné, ve všech drážkách a bývají odděleny lepenkovou izolací. Nevýhodou hladkého rozběhu je menším využitím drážkového prostoru a větší pracnost vinutí. Obě vinutí mají různou váhu mědi, a proto dosáhneme lepšího využití drážkového prostoru, jestliže se nedodrží přesné sinusové rozložení. Při uložení vinutí do drážek se ukládá prvně hlavní vinutí a poté pomocné, protože pomocné vinutí je z mosazného drátu a trpí nejvíce poruchami, a též aby k němu byl lepší přístup pro opravu.

Materiál používaný na vinutí motorů je nejčastěji měděný smaltový drát. Odporová pomocná vinutí strojů bývá často ze smaltového drátu z mosazi, která má pětikrát menší vodivost než měď. Nedoporučuje se dělat vinutí z tenkého měděného drátu, protože tepelná kapacita tohoto vinutí je malá. Proto se někdy umísťuje v nejméně využitých drážkách několik závitů pomocného vinutí opačným směrem, takže magnetomotorická síla vinutí se ruší a uplatňuje se pouze svým činným odporem [5].

3.3.2 Jednofázové a trojfázové vinutí

Pomocná impedance stroje slouží většinou k rozběhu stroje, který po rozběhu odpojí pomocnou impedanci a motor běží jako třífázový s odpojeným jedním přívodem. Tento stroj lze také posuzovat jako jednofázový, kde jeho vinutí je tvořeno dvěma vinutími zapojené v sérii. Zapojí-li se trojfázový motor tak, že dvě fázová vinutí se spojí do série, dostaneme vinutí, které je totožné s jednofázovým vinutím a tento motor je stejně navinutý jako jednofázový indukční motor. Jak již bylo zmíněno, hlavní vinutí zaujímá dvě třetiny drážek a drážky jsou stejně proudově zatíženy. Tato skutečnost vede k tomu, že diferenční rozptyl jednofázového vinutí je stejný jako u trojfázového stroje se stejným počtem drážek statoru [5].

3.4 Způsoby zapojení jednofázových motorů

3.4.1 Spouštění jednofázových motorů

V jednofázovém motoru, do kterého se přivede napětí, se začne na rotoru indukovat stojící střídavé magnetické pole, které je jenom pulzující a točivý moment je roven nule. Tento problém se dá vyřešit tak, že se motor doplní takovými částmi, které vytvoří tak velký dostatečný záběrný moment. Do statoru se umísťují rozběhové komponenty, které se vkládají vedle hlavního vinutí, jejichž úlohou je umožnit rozběh motoru.

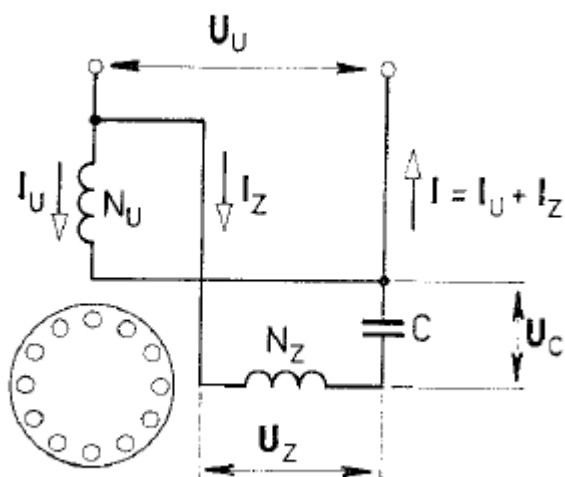
Nejčastější používané rozběhové komponenty jsou odpor a kapacita, které vzájemně posunují proudy s proudy hlavních vinutí a tím tak vznikne v motoru točivé magnetické pole. Při takovém rozběhu bude motor pracovat jako dvoufázový. Točivé pole bude nabývat eliptického tvaru. Existuje typ vinutí, které umožňuje posun proudů ve vinutí a po rozběhu se odpojí. Tyto motory se nazývají jednofázové asynchronní motory s pomocnou rozběhovou fází.

Malé motorky pro malé výkony se nejčastěji vyrábí s vyniklými póly. Jejich pomocné rozběhové vinutí se nepřipojuje k síti, ale jako závit nakrátko obepínající část pólového nástavce. Proud rozběhového vinutí vzniká transformační vazbou s pracovním vinutím.

Spuštění jednofázového asynchronního motoru je horší než spouštění třífázového, protože při zapojení vzniká zpětné pole, které snižuje záběrný i rozběhový moment. Proto se motory s dvojitou a vírovou klecí nepoužívají a používají se jenom s odporovou klecí, protože by zpětné pole vyvolalo velké ztráty a brzdné momenty [6].

3.4.2 Spouštění s trvale připojeným kondenzátorem

Spouštění asynchronních motorů s trvale připojeným kondenzátorem má ve statoru obě vinutí vůči sobě pootočena o 90° elektrických. Tyto vinutí jsou po rozběhu motoru trvale připojena i při normálním chodu. Kondenzátor, který se po rozběhu ve statoru neodpojí, má zlepšovat pracovní i rozběhové charakteristiky motoru, které jsou tak bližší k charakteristikám normálních trojfázových motorů. Toto spojení představuje dvoufázový motor připojený na nesouměrné napětí. Trvale připojené pomocné vinutí lze použít jen kapacitní, neboť odporové a induktivní vinutí neumožňuje zvýšit výkon motoru při trvalém připojení [5][6].



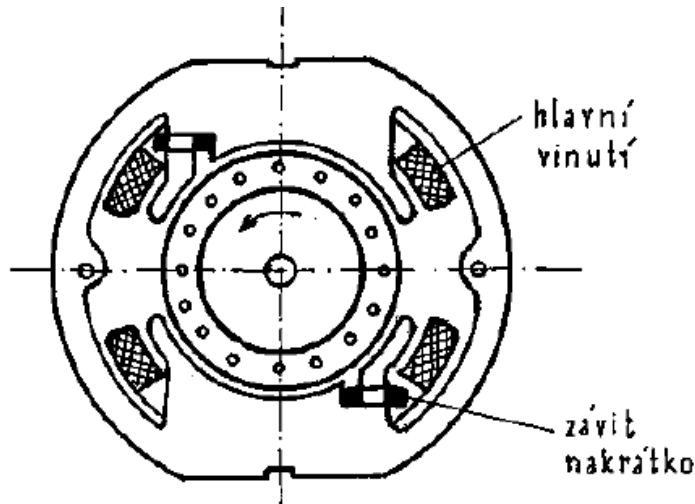
Obr. 12. Schéma zapojení motoru s trvale připojeným kondenzátorem [6]

Nevýhoda těchto motorů je, že jalový výkon kondenzátoru se rovná zdánlivému příkonu motoru. Kondenzátor zajistí točivé magnetické pole pouze při jednom zatížení a při změně vznikne točivé eliptické pole. Eliptické pole je zpětné pole, které zhoršuje vlastnosti motoru. Tento problém jde odstranit stupňovitou změnou kapacity, anebo zajistit zapojení cívky s řízenou indukčností.

Vhodnou volbou připojení kondenzátoru můžeme v širokých mezích měnit velikost záběrného a maximálního momentu motoru. Jednofázový asynchronní motor s trvale připojeným kondenzátorem může pracovat jako třífázový motor, protože lze řídit otáčky obdobně jako u třífázových motorů. Měnit otáčky lze změnou velikosti kapacity, napájecího napětí, kmitočtu nebo změnit počet pólů. Jednofázové motory s trvale připojeným kondenzátorem mohou pracovat jako generátor či brzda [6].

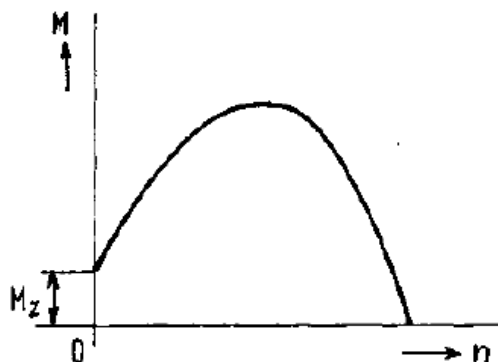
3.5 Asynchronní motor se stíněnými póly

Asynchronní motor se stíněnými póly má většinu statorového vinutí spojené dokrátka a provádí se jako holý závit umístěný v drážce na každém pólu statoru, který má vyjádřen jeden pól na jednu hlavní drážku. Statorové plechy mají vyniklé póly a závit je z měděného pásku. Působením magnetického pole hlavního vinutí, které pulzuje, způsobí průchod proudu nakrátko a vytváří pulzující magnetické pole, které v každém okamžiku působí proti poli hlavního vinutí a je důsledkem zpoždění magnetického pole v nestíněné části pólu. Tento průběh posouvá amplitudu magnetického toku na povrchu pólu od nekryté části ke stíněné části a vzniká točivý moment. Rotor má obvykle klecové vinutí [4][5].



Obr. 13. Asynchronní motor se stíněnými póly [4]

Tyto motory se uplatňují nejvíce u malých spotřebičů s malým rozběhem do výkonu 20 W. Tyto motorky mají malou účinnost, malý účinník a velmi malý záběrný moment. Výhodou těchto motorků je jednoduchá a levná konstrukce. Směr otáčení motoru je dán polohou stíněného závitu, proto má tento motor jeden směr otáčení [5].



Obr. 14. Momentová charakteristika motoru se stíněnými póly [4]

4 ANALYTICKÝ VÝPOČET PARAMETRŮ

4.1 Úvod

Analytický výpočet parametrů motorů se počítá pro zjištění důležitých veličin pro návrh skutečného motoru, který se potom vyrábí v továrnách. Při řešení skutečného jednofázového asynchronního motoru se nerespektují obvykle všechny podrobnosti, ale používají se zjednodušené předpoklady. Jedná se o konstantní indukčnost a reaktanci, rozložení magnetického pole ve vzduchové mezeře a ztráty v železe se uvažují zjednodušeným způsobem. Všechny vypočítané parametry a veličiny se musí brát s rezervou a nemohou se brát jako konečné. Všechny nedostatky se odstraňují zkoušením ve zkušebnách. V praxi se zavádí korekční faktory, které mají výsledek přiblížit co nejvíce ke skutečným hodnotám, aby odstranily nedostatky zjednodušených předpokladů. V odborných knihách se autoři snaží docílit výpočtem co nejpřesnějších výsledků. Každý výpočet se provádí jinak a existuje mnoho způsobů řešení výpočtů [7].

4.2 Analytický výpočet

V této kapitole je podrobně znázorněn analytický návrh zadaného jednofázového motoru. Pro rychlou a přehlednou orientaci ve výpočtech budou u vzorců znázorněny přesné výpočty. Vzorce byli čerpány lit. [3]. Byly použity parametry motoru 1LF7090-4AB ze štítkových hodnot.

Navrhovaný stroj je malý jednofázový motor s výkonem 1,1 kW a účinnkem 0,98. Motor je napájen napětím sítě 230 V o kmitočtu 50 Hz a proudem 6,6 A. Otáčky rotoru jsou 1420 min^{-1} a účinnost motoru je 74 %.

Příkon stroje:

$$P_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi = 230 \cdot 6,6 \cdot 0,98 = 1487,64 \text{ W}, \quad (4.1)$$

kde U_1 je napětí odebírané ze sítě, I_1 je proud odebíraný ze sítě a $\cos\varphi$ je účinník motoru.

Ověření účinnosti stroje:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{1100}{1487,64} = 0,74 \Rightarrow 74 \%, \quad (4.2)$$

kde P_2 je výkon motoru a P_1 je příkon motoru. Vypočítaná účinnost je stejná jako zadaná.

Uvažujeme síť, která má kmitočet 50 Hz, a proto jsou maximální otáčky, které můžeme dosáhnout v této síti 3000 min^{-1} . Podle otáček rotoru určíme nejbližší vyšší jmenovité otáčky magnetického pole motoru, které jsou 1500 min^{-1} .

Počet pólových dvojic:

$$p = \frac{60 \cdot f}{n_1} = \frac{60 \cdot 50}{1500} = 2 [-], \quad (4.3)$$

kde f je kmitočet sítě a n_1 jsou jmenovité otáčky pole motoru.

Skluz motoru:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{1500 - 1420}{1500} = 0,0534 \Rightarrow 5,34 \%, \quad (4.4)$$

kde n_1 jsou jmenovité otáčky pole motoru a n jsou otáčky rotoru.

Vnitřní zdánlivý výkon stroje:

$$P_i = \frac{P_2 \cdot (1 - \varepsilon)}{\eta \cdot \cos \varphi} = \frac{1100 \cdot (1 - 0,04)}{0,74 \cdot 0,98} = 1456,15 \text{ W}, \quad (4.5)$$

kde P_2 je výkon motoru, η je účinnost motoru, $\cos \varphi$ je účiník a ε je úbytek napětí, které podle počtu pólových je určeno $\varepsilon = 0,04$.

Odpovídající výkon trojfázového stroje:

$$P_3 = 1,5 \cdot P_i = 1,5 \cdot 1456,15 = 2184,23 \text{ W}, \quad (4.6)$$

kde P_i je vnitřní zdánlivý výkon.

Pro návrh řady asynchronních motorů se používá veličina vrtání statoru D , která se v posledních letech už málo mění. Tato veličina závisí na počtu pólů.

Vrtání statoru:

$$D = (6,7 + 2p) \cdot P_i^{0,29} \cdot 10^{-3} = 10,7 \cdot 1456,15^{0,29} \cdot 10^{-3} = 88,45 \text{ mm}. \quad (4.7)$$

Proudová vrstva:

$$A = C_A \cdot P_i^{0,15} = 7400 \cdot 1456,15^{0,15} = 22065 \text{ A/m}, \quad (4.8)$$

kde P_i je vnitřní zdánlivý výkon, C_A je konstanta a určí se podle počtu pólů. Pro dvě pólové dvojice platí $C_A=7400$.

Pólová rozteč:

$$\tau_p = \frac{\pi \cdot D}{2p} = \frac{\pi \cdot 88,45}{4} = 69,47 \text{ mm}, \quad (4.9)$$

kde p je počet pólových dvojic.

Pro určení délky železa potřebujeme vrtání statoru D a indukci ve vzduchové mezeře B_δ .

Amplituda magnetické indukce ve vzduchu:

$$B_\delta = 0,39 \cdot P_i^{0,05} = 0,39 \cdot 1456,15^{0,05} = 0,56 \text{ T}. \quad (4.10)$$

Ověření proud fáze ve statoru:

$$I_1 \frac{P_2}{U_1 \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{1100}{230 \cdot 0,74 \cdot 0,98} = 6,59 \text{ A}. \quad (4.11)$$

Proud náhradního trojfázového motoru:

$$I_3 = \frac{1,5 \cdot I_1}{3} = \frac{1,5 \cdot 6,59}{3} = 3,3 \text{ A}. \quad (4.12)$$

Počet závitů v sérii:

$$N_{s1} = \frac{\pi \cdot D \cdot A}{6 \cdot I_3} = \frac{\pi \cdot 0,08845 \cdot 22065}{6 \cdot 3,3} = 309,6 \text{ závitů} \Rightarrow 320 \text{ závitů}, \quad (4.13)$$

kde D je vrtání statoru, A je proudová vrstva a I_3 je proud náhradního trojfázového motoru. Počet statorových drážek na pól a fázi se zvolí co největší možné číslo, které určuje počet vodičů na jednu drážku.

Počet drážek ve statoru:

$$Q_1 = 6 \cdot p \cdot q_1 = 6 \cdot 2 \cdot 3 = 36 \text{ drážek}, \quad (4.14)$$

kde p je počet pólových dvojic a q_1 je tabulková konstanta počtu drážek. q_1 se volí podle velikosti stroje a napětí. Zadaný stroj má počet pólů $2p=4$ a podle toho se určí konstanta $q_1=3$, když stroj má výkon do 7,5 kW.

Daný motor má podle výpočtu 36 drážek ve statoru, protože motor je jednofázový potřebuje rozdělit statorové drážky na hlavní vinutí a rozběhové vinutí. Obvykle hlavní vinutí zaplňuje dvě třetiny drážek a jedna třetina drážek je určena na pomocné vinutí. Tento způsob uvažuje, že rozběhový člen se po rozběhu stroje odpojí a motor bude pracovat bez rozběhové fáze. V poslední letech se přechází k rozdělení drážek na polovinu. Tento motor bude rozdělen tak, že 20 drážek bude sloužit na hlavní vinutí a 16 drážek na pomocné vinutí. Tento způsob rozdělení drážek určuje, že po rozběhu se rozběhový člen nerozpojí a bude pracovat i při normálním chodu, tedy po rozběhu.

Počet vodičů v jedné drážce hlavního vinutí:

$$n_{d1} = \frac{2 \cdot N_{s1}}{20} = \frac{2 \cdot 320}{20} = 32 \text{ drátů}. \quad (4.15)$$

Činitel vinutí:

$$k_v = \frac{2 \cdot 32 \cdot \cos 15^\circ + 2 \cdot 16 \cdot \cos 45^\circ}{2 \cdot 32 + 2 \cdot 16} = 0,88 [-]. \quad (4.16)$$

Magnetický tok:

$$\Phi = \frac{U_1 \cdot (1 - \varepsilon)}{\pi \cdot \sqrt{2} \cdot k_v \cdot f \cdot N_{s1}} = \frac{230 \cdot (1 - 0,04)}{\pi \cdot \sqrt{2} \cdot 0,88 \cdot 50 \cdot 320} = 3,53 \text{ mWb}, \quad (4.17)$$

kde k_v je činitel vinutí, f je frekvence sítě a N_{s1} je počet závitů v sérii.

Efektivní délka železa:

$$L_e = \frac{\Phi}{\alpha \cdot \tau_p \cdot B_\delta} = \frac{0,00353}{0,75 \cdot 0,06947 \cdot 0,56} = 121 \text{ mm}, \quad (4.18)$$

kde Φ je magnetický tok, τ_p je pólová rozteč, B_δ je magnetická indukce ve vzduchové mezeře a α je činitel plnění pólové křivky, kde je tabulková hodnota $\alpha=0,75$.

Přibližná délka čela:

$$l_c = 1,5 \cdot \tau_p = 1,5 \cdot 69,47 = 104,21 \text{ mm}, \quad (4.19)$$

kde τ_p je pólová rozteč.

Průřez vodiče ve statoru se často určuje z empiricky (zkoušené) zvolené hodnoty proudového zatížení. Lze však celkem přesně určit průřez ze ztrát v mědi.

Ztráty v mědi statoru:

$$P_{Cu1} = 0,42 \cdot P_i^{0,75} = 0,42 \cdot 1456,15^{0,75} = 99 \text{ W}, \quad (4.20)$$

kde P_i je vnitřní výkon.

Odpor vinutí:

$$R_1 = \frac{P_{Cu1}}{I_1^2} = \frac{99}{6,59^2} = 2,28 \Omega, \quad (4.21)$$

kde P_{Cu1} jsou ztráty v mědi statoru a I_1 je proud ve statoru.

Průřez drátu hlavního vinutí:

$$S_1 = \frac{2 \cdot 10^{-6} \cdot (L + l_c) \cdot N_{s1}}{R_1} = \frac{2 \cdot 10^{-6} \cdot (0,121 + 0,10421) \cdot 320}{2,28 \cdot 48} \quad (4.22)$$

$$S_1 = 1,32 \text{ mm}^2,$$

kde L je efektivní délka železa, l_c je přibližná délka čela, N_{s1} je počet závitů v sérii a R_1 je odpor vinutí.

Průměr drátu hlavního vinutí:

$$d = 2 \cdot r = 2 \cdot \sqrt{\frac{S_1}{\pi}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{1,32}{\pi}} = 1,296 \text{ mm}, \quad (4.23)$$

kde r je poloměr drátu hlavního vinutí a S_1 je průřez drátu.

Drážková rozteč statoru:

$$t_{3s} = \frac{\pi \cdot D}{Q_1} = \frac{\pi \cdot 88,45}{36} = 7,72 \text{ mm}. \quad (4.24)$$

Drážková rozteč rotoru:

$$t_{3s} = \frac{\pi \cdot D}{Q_2} = \frac{\pi \cdot 88,45}{26} = 10,69 \text{ mm}. \quad (4.25)$$

Skutečná amplituda indukce v statorovém zubu je průměrně $B_{zs}=1,6 \text{ T}$ u strojů čtyřpólových (v našem případě) až šestipólových. U více pólových a dvoupólových je hodnota menší než tento průměr.

Šířka zubu statoru:

$$b_{zs} = 7,72 \cdot \frac{B_\delta}{0,9 \cdot B_{zs}} = 7,72 \cdot \frac{0,56}{0,9 \cdot 1,6} = 3 \text{ mm}, \quad (4.26)$$

kde B_δ je magnetická indukce ve vzduchu a B_{zs} magnetická indukce ve statorovém zubu.

Výška jha statoru:

$$h_{js} = \frac{\Phi}{2 \cdot L_e \cdot 0,9 \cdot B_{zs}} = \frac{0,00353}{2 \cdot 0,121 \cdot 0,9 \cdot 1,6} = 10,13 \text{ mm}, \quad (4.27)$$

kde Φ je magnetický tok, L_e je efektivní délka železa a B_{zs} magnetická indukce ve statorovém zubu.

Jho rotoru se sytí $B_{jr}=1,6$ T v nejvíce zatíženém průřezu. Magnetický tok v jho rotoru je:

$$\Phi_{jr} = (1 - 2 \cdot \varepsilon) \cdot \Phi = (1 - 2 \cdot 0,04) \cdot 0,00353 = 3,25 \text{ mWb}, \quad (4.28)$$

kde Φ je magnetický tok a ε je úbytek napětí.

Výška jho:

$$h_{jr} = \frac{\Phi_{jr}}{2 \cdot L_e \cdot 0,9 \cdot B_{jr}} = \frac{0,00325}{2 \cdot 0,121 \cdot 0,9 \cdot 1,6} = 9,33 \text{ mm}, \quad (4.29)$$

kde Φ_{jr} je magnetický tok v rotoru, L_e je efektivní délka železa a B_{jr} magnetická indukce v rotorovém zubu.

Vnitřní výška statorového zubu:

$$h_s = 0,8 + 12,919 = 13,72 \text{ mm}, \quad (4.30)$$

kde tyto hodnoty(rozměry) jsou odečteny z technické dokumentace statoru.

Vnější průměr plechů:

$$D_c = D + 2 \cdot h_s + 2 \cdot h_{js} = 88,45 + 2 \cdot 13,72 + 2 \cdot 10,13 = 136,15 \text{ mm}. \quad (4.31)$$

Vzduchová mezera:

$$\delta = C \cdot \sqrt[3]{\frac{D^2 \cdot L}{2 \cdot p}} = 4 \cdot \sqrt[3]{\frac{136,15^2 \cdot 121}{2 \cdot 2}} = 0,24 \text{ mm zvolena } 0,25 \text{ mm}, \quad (4.32)$$

kde D je vnější průměr plechů, L je efektivní délka železa, p je počet pólů a C je konstanta stroje. Pro čtyřpólové stroje je konstanta $C=4$. Velikost vzduchové mezery musí být dělitelné 0,05.

Šířka zubu rotoru:

$$b_{zr} = (1 - \varepsilon) \cdot b_{zs} \cdot \frac{Q_1}{Q_2} = (1 - 0,04) \cdot 3 \cdot \frac{36}{26} = 3,99 \text{ mm}, \quad (4.3)$$

kde b_{zs} je šířka zubu statoru, Q_1 je počet drážek statoru a Q_2 je počet drážek rotoru.

Průřez tyče z technické dokumentace:

$$S_t = 35,31 \text{ mm}^2. \quad (4.34)$$

Průřez kruhů:

$$S_c = S_t \cdot \frac{Q_2}{2 \cdot p \cdot \pi} = 35,31 \cdot \frac{26}{4 \cdot \pi} = 73,47 \text{ mm}^2, \quad (4.35)$$

kde S_t je průřez tyče a Q_2 je počet drážek rotoru.

Carterův činitel pro stator:

$$k_{cs} = \frac{t_{3s}}{t_{3s} - \delta - 0,75 \cdot b_3} = \frac{7,72}{7,72 - 0,25 - 0,75 \cdot 2,5} = 1,27 [-], \quad (4.36)$$

kde t_{3s} je drážková rozteč statoru a b_3 je šířka mezery zubu podle obr. 15.

Carterův činitel pro rotor:

$$k_{cr} = \frac{t_{3r}}{t_{3r} - \delta - 0,75 \cdot b_3} = \frac{10,7}{10,7 - 0,25 - 0,75 \cdot 0,8} = 1,03 [-], \quad (4.37)$$

kde t_{3r} je drážková rozteč rotoru a b_3 je šířka mezery zubu podle obr. 15.

Magnetické napětí pro vzduchovou mezeru:

$$U_{\delta} = 1,6 \cdot 10^6 \cdot B_{\delta} \cdot k_{cs} \cdot \delta = 1,6 \cdot 10^6 \cdot 0,56 \cdot 1,27 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} = 284,48 \text{ A}, \quad (4.38)$$

kde B_{δ} je magnetická indukce ve vzduchu, k_{cs} je Carterův činitel pro stator a δ je vzduchová mezera.

Motor má jakost plechů 800-50 Am, a proto pro magnetickou indukci $B_{zs}=1,6 \text{ T}$ je zvolena z katalogu intenzita $H_{zs}=1480 \text{ A/m}$.

Rovná hrana zubu statoru:

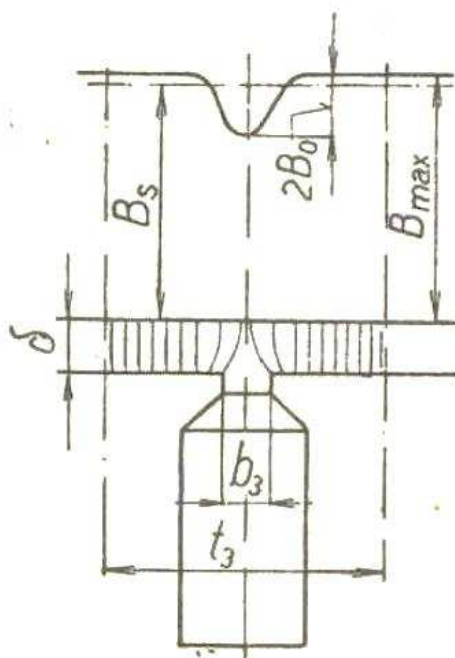
$$h = 12,919 - 2,67 = 10,249 \text{ mm}, \quad (4.39)$$

kde hodnoty jsou z technické dokumentace.

Magnetické napětí pro zuby statoru:

$$U_{zs} = 2 \cdot h \cdot H_{zs} = 2 \cdot 0,0103 \cdot 1480 = 30,34 \text{ A}, \quad (4.40)$$

kde h je rovná hrana zubu stator a H_{zs} je intenzita.



Obr. 15. Tvar drážky [3]

Za předpokladu stejných délek indukčních čar v jednotlivých částech jha se počítá střední hodnota intenzity. Střední hodnota intenzity se počítá z aritmetického průměru jedné třetiny, ze dvou třetin a z celé hodnoty intenzity.

Intenzity pro různé indukce:

$$B = 1,6 \text{ T} \Rightarrow A = 1480 \text{ A/m}, \quad (4.41)$$

$$B_{2/3} = 1,07 \text{ T} \Rightarrow A = 222,3 \text{ A/m}, \quad (4.42)$$

$$B_{1/3} = 0,53 \text{ T} \Rightarrow A = 148,3 \text{ A/m}, \quad (4.43)$$

kde hodnoty intenzit jsou získané pomocí interpolace.

Střední intenzita:

$$H_{js} = \frac{(B + B_{2/3} + B_{1/3})}{3} = \frac{(1480 + 222,3 + 148,3)}{3} = 616,87 \text{ A/m.} \quad (4.44)$$

Délka indukční čáry statoru:

$$l_{js} = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot 0,13615}{4} = 0,107 \text{ m,} \quad (4.45)$$

kde D je vnější průměr plechů a p je počet pólových dvojic.

Magnetické napětí pro jho statoru:

$$U_{js} = l_{js} \cdot H_{js} = 0,107 \cdot 616,87 = 65,96 \text{ A,} \quad (4.46)$$

kde H_{js} je střední intenzita a l_{js} je délka indukční čáry.

Rovná hrana zubu rotoru:

$$h = 8,71, \quad (4.47)$$

kde h je z technické dokumentace.

Magnetické napětí pro zuby rotoru:

$$U_{zr} = 2 \cdot h \cdot H_{zr} = 2 \cdot 0,00871 \cdot 1480 = 25,8 \text{ A,} \quad (4.48)$$

kde h je rovná hrana zubu statoru a H_{zr} je intenzita.

Délka indukční čáry rotoru:

$$l_{jr} = \tau_p = 69,47 \text{ mm.} \quad (4.49)$$

Intenzita v rotoru není poměrně malá a v jednotlivých průřezích jha rotoru jsou indukce malé, a proto se může počítat se střední intenzitou $H_{js}=616,87 \text{ A/m}$.

Magnetické napětí pro jho rotoru:

$$U_{jr} = l_{jr} \cdot H_{jr} = 0,06947 \cdot 616,87 = 42,85 \text{ A,} \quad (4.50)$$

kde H_{jr} je střední intenzita a l_{jr} je délka indukční čáry.

Magnetomotorická síla pólové dvojice:

$$F_m = U_\delta + U_{zs} + U_{js} + U_{zr} + U_{jr} = 284,48 + 30,34 + 65,96 + 25,8 + 42,5 \\ F_m = 449,08 \text{ A,} \quad (4.51)$$

kde U_δ je magnetické napětí vzduchové mezery, U_{zs} je magnetické napětí pro zuby statoru, U_{js} je magnetické napětí pro jho statoru, U_{zr} je magnetické napětí pro zuby rotoru a U_{jr} je magnetické napětí pro jho rotoru.

Magnetizační proud:

$$I_m = \frac{p \cdot F_m}{1,8 \cdot k_v \cdot N_{s1}} = \frac{2 \cdot 449,08}{1,8 \cdot 0,88 \cdot 320} = 1,77 \text{ A,} \quad (4.52)$$

kde p je počet pólových dvojic, F_m je magnetomotorická síla pólové dvojice, k_v je činitel vinutí a N_{s1} je počet závitů v sérii.

Váha zubů statoru:

$$G_z = Q_1 \cdot h_s \cdot b_{zs} \cdot L_e \cdot 0,9 \cdot \gamma = 36 \cdot 0,01372 \cdot 0,003 \cdot 0,121 \cdot 0,9 \cdot 7700 \\ G_z = 1,24 \text{ kg,} \quad (4.53)$$

kde Q_1 je počet drážek statoru, h_s je vnitřní výška statorového zubu, b_{zs} šířka zubu statoru, L_e efektivní délka železa a γ je konstanta.

Váha jha statoru:

$$G_{js} = \pi \cdot D_s \cdot h_{js} \cdot L_e \cdot 0,9 \cdot \gamma = \pi \cdot 0,11 \cdot 0,01013 \cdot 0,9 \cdot 0,121 \cdot 7700$$

$$G_{js} = 2,94 \text{ kg} , \quad (4.54)$$

kde D_s je konstanta, h_{js} je výška jha, L_e efektivní délka železa a γ je konstanta.

V celém statoru je indukce $B=1,6 \text{ T}$ a podle toho je z katalogu pro ztráty v železe určené ztrátové číslo $p_1=7,54 \text{ W/kg}$.

Ztráty v železe:

$$P_{Fe} = 3 \cdot p_1 \cdot B^2 \cdot (G_z + G_{js}) = 3 \cdot 7,54 \cdot 1,6^2 \cdot (1,24 + 2,94) = 242,05 \text{ W} , \quad (4.55)$$

kde p_1 je ztrátové číslo, B indukce ve statoru, G_z je váha zubů statoru a G_{js} je váha jha statoru.

Mechanické ztráty – třením:

$$P_m = 5 \text{ W} , \quad (4.56)$$

kde mechanické ztráty byly odhadnuty z měření motorů o stejném výkonu.

Ztrátový proud:

$$I_z = \frac{P_m + P_{Fe}}{U_1} = \frac{242,05 + 5}{230} = 1,07 \text{ A} , \quad (4.57)$$

kde P_m jsou mechanické ztráty třením a P_{Fe} jsou ztráty v železe.

Mechanické ztráty – ventilační:

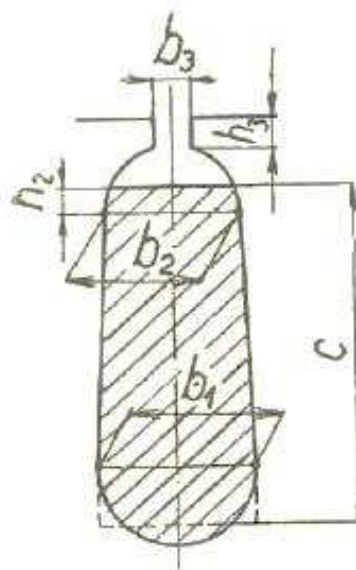
$$P_\delta = 15 \text{ W} , \quad (4.58)$$

kde mechanické ztráty ventilační byly odhadnuty podle velikosti stroje.

Jednotková rozptylová vodivost statorové drážky:

$$\lambda_{d1} = \frac{h_3}{b_3} + 0,524 + \frac{c}{3 \cdot b_2} = \frac{0,8}{2,5} + 0,524 + \frac{10,249}{3 \cdot 3,424} = 1,84 [-] , \quad (4.59)$$

kde h_3, b_3, c, b_2 jsou rozměry statorové drážky podle obr. 16.



Obr. 16. Rozměry statorové drážky [3]

Drážková reaktance:

$$X_{d1} = \frac{4 \cdot \pi \cdot f \cdot N_{s1}^2}{p \cdot q_1} \cdot \mu_0 \cdot L_e \cdot \lambda_{d1} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 320^2}{2 \cdot 3} \cdot 0,4 \cdot \pi \cdot 10^{-6} \cdot 0,1 \cdot 1,8 \quad (4.60)$$

$$X_{d1} = 3 \, \Omega ,$$

kde f je kmitočet sítě, N_{s1} je počet závitů v sérii, q_1 je tabulková hodnota počtu drážek, p je počet pólových dvojic, μ_0 permeabilita vakua, L_e je efektivní délka železa a λ_{d1} jednotková rozptylová vodivost statorové drážky.

Rotorový proud:

$$I_2 = I_1 \cdot (1 - 2 \cdot \varepsilon) \cdot \frac{2 \cdot k_v \cdot N_{s1}}{Q_2} = 6,59 \cdot (1 - 2 \cdot 0,04) \cdot \frac{2 \cdot 0,88 \cdot 320}{26} \quad (4.61)$$

$$I_2 = 131,33 \, \text{A} ,$$

kde I_1 je statorový proud, ε je úbytek napětí, k_v je činitel vinutí, N_{s1} je počet závitů v sérii a Q_2 počet drážek v rotoru.

Proud nakrátko:

$$I_{2k} = 5 \cdot I_2 = 5 \cdot 131,33 = 656,65 \, \text{A} , \quad (4.62)$$

kde I_2 je rotorový proud.

Výpočet rozměru rotorového b_3 :

$$b_3 = \frac{82,02 - 81,07}{2} = 0,475 \, \text{mm} , \quad (4.63)$$

kde jsou hodnoty odečteny z technické dokumentace rotoru.

Magnetický tok nasyceným můstkem:

$$\Phi = 0,9 \cdot L_e \cdot b_3 \cdot B = 0,9 \cdot 0,121 \cdot 0,000475 \cdot 2,2 = 0,114 \, \text{mVs} , \quad (4.64)$$

kde L_e je efektivní délka železa, b_3 je rozměr podle obr. 16 a B je magnetická indukce s hodnotou 2,2 T.

Jednotková magnetická vodivost můstku:

$$\lambda_m = \frac{\Phi_m}{\sqrt{2} \cdot I_{2k} \cdot \mu \cdot L_e} = \frac{0,000114}{\sqrt{2} \cdot 656,65 \cdot 0,4 \cdot \pi \cdot 10^{-6} \cdot 0,121} = 0,81 \, [-] , \quad (4.65)$$

kde Φ_m je magnetický tok nasyceným můstkem, I_{2k} je proud nakrátko, μ je permeabilita vakua a L_e je efektivní délka železa.

Rozptylová vodivost rotorové drážky s můstkem:

$$\lambda_{d2} = \lambda_m + \frac{c}{3 \cdot b_2} = 0,81 + \frac{8,71}{3 \cdot 4,1} = 1,52 \, [-] , \quad (4.66)$$

kde c , b_2 jsou rozměry statorové drážky podle obr. 16 a λ_m je jednotková magnetická vodivost můstku.

Drážková reaktance:

$$X_{d2} = \frac{4 \cdot \pi \cdot f \cdot N_{s1}^2}{p \cdot q_2} \cdot \mu_0 \cdot L_e \cdot \lambda_{d2} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,5^2}{2 \cdot 0,5} \cdot 0,4 \cdot \pi \cdot 10^{-6} \cdot 0,1 \cdot 1,52 \quad (4.67)$$

$$X_{d2} = 0,363 \, \mu\Omega ,$$

kde f je kmitočet sítě, N_{s2} je konstanta s hodnotou 0,5, q_2 je tabulková hodnota počtu drážek s hodnotou 0,5, p je počet pólových dvojic, μ_0 permeabilita vakua, L_e

je efektivní délka železa a λ_{d2} jednotková rozptylová vodivost rotorové drážky s můstkem.

Přepočítací činitel:

$$\chi = \frac{4 \cdot p \cdot k_v^2 N_{s1}^2}{Q_2} = \frac{4 \cdot 2 \cdot 0,88^2 \cdot 320^2}{26} 24399,56 [-], \quad (4.68)$$

kde p je počet pólových dvojic, k_v je činitel vinutí, N_{s1} je počet závitů v sérii a Q_2 je počet drážek rotoru.

Drážková reaktance přepočítaná na stator:

$$X_{d21} = \chi \cdot X_{d2} = 24399,56 \cdot 0,363 \cdot 10^{-6} = 0,866 \Omega, \quad (4.69)$$

kde χ je přepočítací činitel a X_{d2} je drážková reaktance.

Jednotková vodivost rozptylu čel je pro soustředné vinutí na statoru a klec na rotoru je $\lambda_c = 0,318 [-]$.

Reaktance čel:

$$X_c = \frac{4 \cdot \pi \cdot f \cdot N_{s1}^2}{p} \cdot \mu_0 \cdot l_c \cdot \lambda_c = \frac{4 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 320^2}{2} \cdot 0,4 \cdot \pi \cdot 10^{-6} \cdot 0,32 \cdot 0,104 \quad (4.70)$$

$$X_c = 1,34 \Omega,$$

kde f je kmitočet sítě, N_{s1} je počet závitů v sérii, p je počet pólových dvojic, μ_0 permeabilita vakua, l_e je délka čela a λ_c jednotková vodivost.

Činitel diferenčního rozptylu statoru:

$$\tau_{dif1} = 0,00215 + \frac{0,109}{q^2} + \frac{0,0183}{q^4} = 0,00215 + \frac{0,109}{3^2} + \frac{0,0183}{3^4} \quad (4.71)$$

$$\tau_{dif} = 0,014 [-],$$

kde q je tabulkový počet drážek.

Diferenční reaktance statoru:

$$X_{dif1} = \tau_{dif1} \cdot \frac{F_m \cdot U_1}{U_\delta \cdot I_m} = 0,014 \cdot \frac{449,08 \cdot 230}{284,48 \cdot 1,77} = 2,87 \Omega, \quad (4.72)$$

kde τ_{dif1} činitel diferenčního rozptylu statoru, F_m je magnetomotorická síla pólové dvojice, U_1 je napětí sítě, U_δ je magnetické napětí v mezeře a I_m je magnetizační proud.

Počet fází klece:

$$m_2 = \frac{Q_2}{p} = \frac{26}{2} = 13 [-], \quad (4.73)$$

kde Q_2 je počet drážek rotoru a p je počet pólových dvojic.

Činitel diferenčního rozptylu klece:

$$\tau_{dif2} = \frac{3,33}{m^2} = \frac{3,33}{13^2} = 0,0197 [-], \quad (4.74)$$

kde m_2 je počet fází klece a uvažuje se s nekonečnou vodivostí železa.

Diferenční reaktance rotoru:

$$X_{dif2} = \tau_{dif2} \cdot \frac{F_m \cdot U_1}{U_\delta \cdot I_m} = 0,0197 \cdot \frac{449,08 \cdot 230}{284,48 \cdot 1,77} = 4,04 \Omega, \quad (4.75)$$

kde τ_{dif2} činitel diferenčního rozptylu rotoru, F_m je magnetomotorická síla pólové dvojice, U_1 je napětí sítě, U_δ je magnetické napětí v mezeře a I_m je magnetizační proud.

Reaktance hlavního vinutí v nenasyceném stavu:

$$X = X_{d1} + X_{d21} + X_c + X_{dif1} + X_{dif2} = 3 + 0,886 + 1,34 + 2,87 + 4,04$$

$$X = 4,04 \Omega , \quad (4.76)$$

kde X_{d1} je drážková reaktance, X_{d21} drážková reaktance přepočítaná na stator, X_c je reaktance čel, X_{dif1} je diferenční reaktance statoru a X_{dif2} je diferenční reaktance rotoru.

Odpor hlavního vinutí:

$$R_1 = \frac{2 \cdot 10^{-6} \cdot (L + l_c) \cdot N_{s1}}{S_1} = \frac{2 \cdot 10^{-6} \cdot (0,121 + 0,10421) \cdot 320}{48 \cdot 1 \cdot 10^{-6}} = 2,28 \Omega , \quad (4.77)$$

kde L je efektivní délka železa, l_c je přibližná délka čela, N_{s1} je počet závitů v sérii a S_1 je průřez drátu.

Odpor tyče klece:

$$R_t = 0,33 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{L}{S_t} = 0,33 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0,121}{35,51 \cdot 10^{-6}} = 1,13 \mu\Omega , \quad (4.78)$$

kde L je efektivní délka železa a S_t je průřez tyče.

Odpor kruhu:

$$R_c = 0,33 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\pi \cdot D}{S_c} = 0,33 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\pi \cdot 17,56 \cdot 10^{-3}}{73,47 \cdot 10^{-6}} = 0,248 \mu\Omega , \quad (4.79)$$

kde S_c je průřez kruhů a D střední průměr kruhů z technické dokumentace.

Odpor fáze klece:

$$R_2 = \frac{1}{p} \cdot (R_t + 2 \cdot R_c \cdot \frac{Q_2}{(2 \cdot p \cdot \pi)^2}) = \frac{10^{-5}}{2} \cdot (11,3 + 2 \cdot 2,48 \cdot \frac{26}{(2 \cdot 2 \cdot \pi)^2})$$

$$R_2 = 0,606 \mu\Omega , \quad (4.80)$$

kde p počet pólových dvojic, Q_2 je počet drážek v rotoru, R_t je odpor tyče klece a R_c je odpor kruhu.

Odpor přepočítaný na stator:

$$R_{21} = \chi \cdot R_2 = 24399,56 \cdot 0,606 \cdot 10^{-6} = 1,48 \Omega , \quad (4.81)$$

kde χ přepočítací činitel a R_2 je odpor fáze klece.

Celkový odpor:

$$R = R_1 + R_{21} = 2,28 + 1,48 = 3,76 \Omega , \quad (4.82)$$

kde R_1 je odpor hlavního vinutí a R_{21} je odpor přepočítaný na stator.

Impedance nenasycená:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{3,76^2 + 10,91^2} = 11,54 \Omega , \quad (4.83)$$

kde R je celkový odpor a X je reaktance hlavního vinutí v nenasyceném stavu.

Proud nakrátko nenasycený:

$$I_k = \frac{U_1}{Z} = \frac{230}{11,54} = 19,93 \text{ A}, \quad (4.84)$$

kde U_1 je napětí sítě a Z je impedance.

V nasyceném stavu se zmenší diferenční reaktance na polovinu, a proto diferenční reaktance je:

$$X_n = X - \frac{1}{2} \cdot (X_{dif1} + X_{dif2}) = 10,91 - \frac{1}{2} \cdot (2,87 + 4,04) = 7,46 \Omega, \quad (4.85)$$

kde X je reaktance hlavního vinutí, X_{dif1} je diferenční reaktance statoru a X_{dif2} je diferenční reaktance rotoru.

Impedance nasycená:

$$Z_n = \sqrt{X_n^2 + R^2} = \sqrt{7,46^2 + 3,76^2} = 8,35 \Omega, \quad (4.86)$$

kde X_n je diferenční reaktance a R je celkový odpor.

Proud nakrátko nasycený:

$$I_{kn} = \frac{U}{Z} = \frac{230}{8,35} = 27,53 \text{ A}, \quad (4.84)$$

kde U je napětí sítě a Z je impedance.

Rozběhové vinutí se navrhne tak, aby záběrný proud byl stejný jako v hlavním vinutí. Protože tento proud je při zařazeném kondenzátoru určen jen činným odporem, můžeme vypočítat odpor rozběhového vinutí:

Odpor rozběhového vinutí:

$$R_r = \frac{U}{I_{kn}} - R_{21} = \frac{230}{27,53} - 1,48 = 6,88 \Omega, \quad (4.87)$$

kde U je napětí sítě, R_{21} odpor fáze klece přepočítaný na stator a I_{kn} je proud nakrátko nasycený.

Z výrazu pro odpor se odvodí:

$$\frac{N_{sr}}{S_r} = \frac{R_r}{2 \cdot 10^{-6} \cdot (L + l_c)} = \frac{6,88 \cdot 48}{2 \cdot 10^{-6} \cdot (0,121 + 0,104)} = 730 [-], \quad (4.88)$$

kde L je efektivní délka železa, l_c je přibližná délka čela a R_r je odpor rozběhového vinutí.

Rozběhové vinutí má 16 drážek a hlavní má 20 drážek, a proto pro 16 drážek z 36 drážek je 45 %. Drát rozběhového vinutí je menší než drát hlavního vinutí, protože pro tenčí drát je menší plnění vezme se jen 35 %.

Odvození:

$$N_{sr} \cdot S_r = 0,35 \cdot N_{s1} \cdot S_1 = 0,35 \cdot 320 \cdot 1,32 = 148 \text{ mm}^2, \quad (4.89)$$

kde N_{s1} počet závitů v sérii hlavního vinutí a S_1 je průřez drátu hlavního vinutí.

Řešení obou rovnic dává:

$$N_{sr} = \sqrt{730 \cdot 148 \cdot 10^{-6}} = 329 [-]. \quad (4.90)$$

Průřez drátu rozběhového vinutí:

$$S_r = \frac{148}{329} = 0,45 \text{ mm}^2. \quad (4.91)$$

Průměr drátu rozběhového vinutí:

$$d = 2 \cdot r = 2 \cdot \sqrt{\frac{S_r}{\pi}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{0,45}{\pi}} = 0,757 \text{ mm}, \quad (4.92)$$

kde r je poloměr drátu, S_r je průřez drátu.

Počet vodičů rozběhového vinutí:

$$2 \cdot (32 - 16) \cdot \frac{2 \cdot 329}{320} = 66 \text{ vodičů}. \quad (4.93)$$

Odpor rozběhového vinutí:

$$R_r = \frac{2 \cdot 10^{-6} \cdot (L + l_c) \cdot N_{sr}}{S_r} = \frac{2 \cdot 10^{-6} \cdot (0,121 + 0,10421) \cdot 329}{0,45 \cdot 10^{-6} \cdot 48} = 6,68 \Omega, \quad (4.94)$$

kde L je efektivní délka železa, l_c je přibližná délka čela, N_{sr} je počet závitů v sérii rozběhového vinutí a S_r je průřez drátu rozběhového vinutí.

Celkový odpor:

$$R = R_r + R_{21} = 8,34 \Omega, \quad (4.95)$$

kde R_r je odpor rozběhového vinutí a R_{21} je odpor fáze klece přepočítaný na stator.

Proud odporového kruhu je:

$$I_r = \frac{U}{R} = \frac{230}{8,34} = 27,57 \text{ A}, \quad (4.96)$$

kde U je napětí sítě a R je celkový odpor.

Drážková reaktance rozběhového vinutí:

$$X_{dr} = \frac{4 \cdot \pi \cdot f \cdot N_{sr}^2}{p \cdot q_r} \cdot \mu_0 \cdot L_e \cdot \lambda_{d1} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 329^2}{2 \cdot 2} \cdot 0,4 \cdot \pi \cdot 10^{-6} \cdot 0,1 \cdot 1,8 \quad (4.97)$$

$$X_{dr} = 4,76 \Omega,$$

kde f je kmitočet sítě, N_{sr} je počet závitů v sérii rozběhového vinutí, q_r je tabulková hodnota počtu drážek, p je počet pólových dvojic, μ_0 permeabilita vakua, L_e je efektivní délka železa a λ_{d1} jednotková rozptylová vodivost statorové drážky.

Reaktance čel:

$$X_c = X_c \cdot \left(\frac{N_{sr}}{N_{s1}} \right)^2 = 1,34 \cdot \left(\frac{329}{320} \right)^2 = 1,38 \Omega, \quad (4.98)$$

kde X_c je reaktance čel, N_{sr} je počet závitů v sérii rozběhového vinutí, N_{s1} je počet závitů v sérii hlavního vinutí.

Přepočítací činitel:

$$\chi_r = \frac{4 \cdot p \cdot k_v^2 \cdot N_{sr}^2}{Q_2} = \frac{4 \cdot 2 \cdot 0,88^2 \cdot 329^2}{26} = 25791,33 [-], \quad (4.99)$$

kde p je počet pólových dvojic, k_v je činitel vinutí, N_{sr} je počet závitů v sérii rozběhového vinutí a Q_2 je počet drážek rotoru.

Přepočítaná rotorová reaktance:

$$X_{d2r} = \chi_r \cdot X_{d2} = 25791,33 \cdot 3,63 \cdot 10^{-5} = 0,94 \, \Omega, \quad (4.100)$$

kde χ_r je přepočítávací činitel a X_{d2} je drážková reaktance.

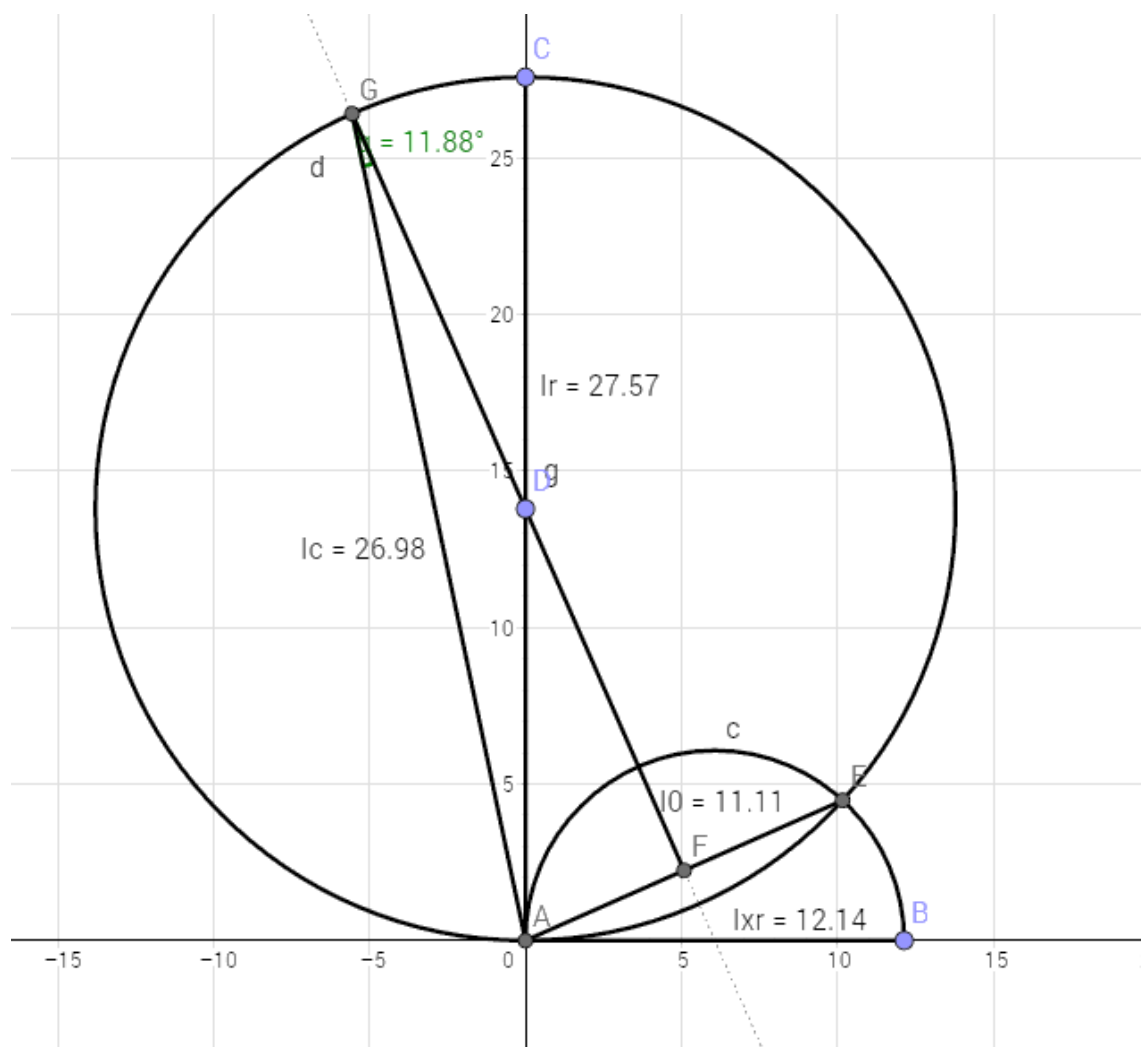
Činitel diferenčního rozptylu rozběhového vinutí:

$$\tau_{difr} = 0,0965 [-]. \quad (4.101)$$

Diferenční reaktance v nasyceném stavu:

$$X_{dif1} = \frac{1}{2} \cdot \tau_{difr} \cdot \frac{F_m \cdot U_1}{U_\delta \cdot I_m} = \frac{1}{2} \cdot 0,0965 \cdot \frac{449,08 \cdot 230}{284,48 \cdot 1,77} = 9,9 \, \Omega, \quad (4.102)$$

kde τ_{difr} činitel diferenčního rozptylu rozběhového vinutí, F_m je magnetomotorická síla pólové dvojice, U_1 je napětí sítě, U_δ je magnetické napětí v mezeře a I_m je magnetizační proud.



Obr. 17. Grafické určení kapacity rozběhového kondenzátoru

Na obr. 17 jsme je zkonstruován diagram, z kterého je určen proud pro největší možný odběr. Z diagramu je odečten proud $I_c=26,98$ A a úhel $\varphi=11,98^\circ$.

Diferenční reaktance klece v nasyceném stavu:

$$X_{dif2} = \frac{1}{2} \cdot X_{dif2} = \frac{1}{2} \cdot 4,04 = 2,02 \, \Omega, \quad (4.103)$$

kde X_{dif2} je diferenční reaktance rotoru.

Celková reaktance vztažená na rozběhové vinutí:

$$X_r = X_{dr} + X_{d2r} + X_c + X_{dif1} + X_{dif2} = 4,76 + 0,94 + 1,38 + 9,4 + 2,02$$

$$X_r = 19 \, \Omega, \quad (4.104)$$

kde X_{dr} drážková reaktance rozběhového vinutí, X_{d2r} je přepočtená rotorová reaktance, X_c je reaktance čel, X_{dif1} je diferenční reaktance v nasyceném stavu a X_{dif2} je diferenční reaktance klece v nasyceném stavu.

Proud:

$$I_{xr} = \frac{U}{X_r} = \frac{230}{19} = 12,14 \, A, \quad (4.105)$$

kde U je napětí sítě a X_r je celková reaktance.

Impedance:

$$Z_c = \frac{U}{I_c} = \frac{230}{26,98} = 8,53 \, \Omega, \quad (4.106)$$

kde U je napětí sítě a I_c je proud, který jsme odečetli z obr. 17.

Reaktance:

$$X_c = Z_c \cdot \sin \varphi = 8,53 \cdot \sin 11,98 = 1,77 \, \Omega, \quad (4.107)$$

kde Z_c je impedance a φ je úhel, odečtený z obr. 17.

Reaktance kondenzátoru:

$$X_k = X_c + X_r = 1,77 + 19 = 20,77 \, \Omega, \quad (4.108)$$

kde X_c je reaktance a X_r je celková reaktance vztažená na rozběhové vinutí.

Kapacita rozběhového kondenzátoru:

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_k} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 20,77} = 153 \, \mu F, \quad (4.109)$$

kde f je kmitočet sítě a X_k je reaktance kondenzátoru.

Kapacita kondenzátoru $C=153 \, \mu F$ je vypočtena podle lit. [3], kde velikost tohoto rozběhového kondenzátoru se uvažuje pro stav, kdy se po rozběhu motoru rozpojí a motor dále pracuje bez činnosti kondenzátoru. Jelikož celý motor je navrhován s trvale připojeným kondenzátorem, tak tato hodnota je uvedena jako orientační.

Vnější průměr statoru:

$$D_1 = 136,15 \, mm. \quad (4.110)$$

Vnitřní průměr statoru:

$$D_2 = D_1 - 2 \cdot (h_{js} + h_s) = 136,15 - 2 \cdot (10,13 + 13,72) = 88,452, \quad (4.111)$$

kde D_1 je vnější průměr statoru, h_{js} je výška jha statoru a h_s je vnitřní výška statorového zubu. Rozměry výšky statorového zubu a jha statoru je vynásobena číslem dvě, protože se uvažuje odečet z obou stran statoru.

Vnější průměr rotoru:

$$d_1 = D_2 - 2 \cdot \delta = 88,452 - 2 \cdot 0,25 = 87,952 \text{ mm}, \quad (4.112)$$

kde D_2 je vnitřní průměr statoru a δ je velikost vzduchové mezery. Velikost vzduchové mezery je vynásobena číslem dvě, protože vzduchová mezera obepíná z obou stran rotor.

Vnitřní výška rotorového zubu:

$$h_r = 1,43 + 2,05 + 8,71 + 1 = 13,19 \text{ mm}, \quad (4.113)$$

kde tyto hodnoty(rozměry) jsou odečteny z technické dokumentace rotoru.

Vnitřní průměr rotoru:

$$d_2 = d_1 - 2 \cdot (h_r + h_{jr}) = 87,952 - 2 \cdot (13,19 + 9,33) = 42,912 \text{ mm}, \quad (4.114)$$

kde d_1 je vnější průměr rotoru, h_r je vnitřní výška rotorového zubu a h_{jr} je výška jho rotoru. Rozměry výšky rotorového zubu a jho rotoru je vynásobena číslem dvě, protože se uvažuje odečet z obou stran rotoru.

Ověření kapacity trvale připojeného kondenzátoru výpočtem podle lit. [6]:

Tab. 1. Srovnání odporů rozběhového a hlavního vinutí

Odpor Vinutí	Vypočtené hodnoty (Navržené)	Modelové hodnoty (Ansys)
Hlavního [Ω]	2,28	2,41
Rozběhové [Ω]	6,68	6,13

Výpočet napětí rozběhového vinutí podle navržených hodnot:

$$U_{1r} = I_r \cdot R_{r1} = 4,82 \cdot 6,88 = 33,16 \text{ V}, \quad (4.115)$$

kde I_r je proud rozběhového vinutí a R_{r1} je vypočtený odpor rozběhového vinutí.

Výpočet napětí hlavního vinutí podle navržených hodnot:

$$U_{1h} = I_h \cdot R_{h1} = 8,54 \cdot 2,28 = 19,47 \text{ V}, \quad (4.116)$$

kde I_h je proud hlavního vinutí a R_{h1} je vypočtený odpor hlavního vinutí.

Výpočet velikosti kondenzátoru podle navržených hodnot:

$$C_1 = \frac{I_r}{\omega \cdot \sqrt{U_{1h}^2 + U_{1r}^2}} = \frac{4,82}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \sqrt{19,47^2 + 33,16^2}} = 39,89 \mu F, \quad (4.117)$$

kde ω je úhlová rychlost, I_r je proud rozběhového vinutí, U_{1h} je napětí hlavního vinutí podle navržených hodnot a U_{1r} je napětí rozběhového vinutí podle navržených hodnot.

Výpočet napětí rozběhového vinutí podle modelových hodnot:

$$U_{2r} = I_r \cdot R_{r2} = 4,82 \cdot 6,13 = 29,55 \text{ V}, \quad (4.118)$$

kde I_r je proud rozběhového vinutí a R_{r2} je modelový odpor rozběhového vinutí.

Výpočet napětí hlavního vinutí podle modelových hodnot:

$$U_{2h} = I_h \cdot R_{h2} = 8,54 \cdot 2,41 = 20,58 \text{ V}, \quad (4.120)$$

kde I_h je proud hlavního vinutí a R_{h2} je modelový odpor hlavního vinutí.

Výpočet velikosti kondenzátoru podle modelových hodnot:

$$C_2 = \frac{I_r}{\omega \cdot \sqrt{U_{2h}^2 + U_{2r}^2}} = \frac{4,82}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \sqrt{20,58^2 + 29,55^2}} = 42,6 \mu F, \quad (4.121)$$

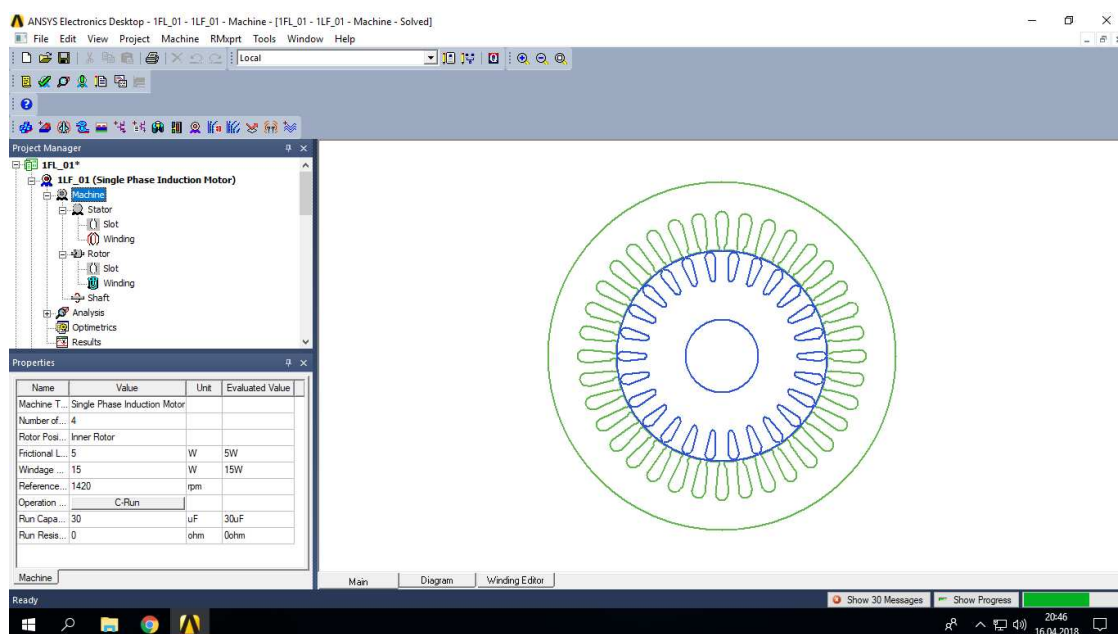
kde ω je úhlová rychlost, I_r je proud rozběhového vinutí, U_{2h} je napětí hlavního vinutí podle modelových hodnot a U_{2r} je napětí rozběhového vinutí podle modelových hodnot.

Uvedené výpočty velikostí trvale připojeného kondenzátoru jsou počítány pro ověření určené kapacity, a to pro dvě podobné hodnoty odporů rozběhového a hlavního vinutí. První část je počítána s odpory z analytického výpočtu a druhá část je počítána s modelovými hodnotami určeného programem Ansys RMxprt.

Z uvedených výsledků lze rozpoznat, že výpočet s modelovými hodnotami je stejný jako výpočet s hodnotami z analytického výpočtu a výchyly výpočtů se mohou zanedbat.

4.3 ANSYS RMxprt

ANSYS RMxprt je program pro návrh a optimalizaci elektrických točivých strojů. Program je součástí balíčku ANSYS Electronic Desktop, který obsahuje mnoho dalších užitečných programů pro výpočet a návrh točivých a netočivých strojů. Umí také vypočítat různé parametry magnetického pole a dalších elektronických vazeb.



Obr. 18. Uživatelské rozhraní programu ANSYS RMxprt

Tento program využívá analytických vztahů při výpočtu charakteristik elektrických strojů. Přitom využívá znalosti náhradních schémat. Program obsahuje předem definované šablony různých motorů, jako je např. synchronní, asynchronní, stejnosměrných atd. Nabízí pohodlné ovládání a přehledné menu, kde si sám uživatel nadefinuje určité konstrukční části motoru. Je to vhodný nástroj pro návrh stroje a provádí výpočty na základě konstrukčních parametrů. Obsahuje rozsáhlou knihovnu materiálů, v níž jsou zahrnuty všechny potřebné a dostupné materiály. Výstupem programu je, že dokáže vykreslit definované charakteristiky a vypočítat parametry motoru [8].

4.4 Srovnání navrhovaného a zadaného motoru

V programu ANSYS RMxpert byly nadefinovány modely třech motorů. První model byl motor s vypočtenými hodnotami z analytického výpočtu, druhý model motoru je upravený navržený motor s lepší účinností a třetí model je motor se zadanými hodnotami. Model zadaného motoru má převzaté parametry z technické dokumentace a model navrženého motoru má hodnoty čerpané z výpočtu, které jsou uvedeny v kap. 4.2. Do programu byly zadány všechny rozměry motoru, tj. délka železa, velikost vzduchové mezery, velikost statorového a rotorového zubu, kde se musí zvolit správný tvar zubů, počet drážek atd. Všechny tyto parametry byly čerpány z analytického výpočtu. K výpočtu parametrů navrženého motoru nestačí jen údaje ze štítku, a proto při nedostatku informací byly čerpány informace z technické dokumentace zadaného motoru.

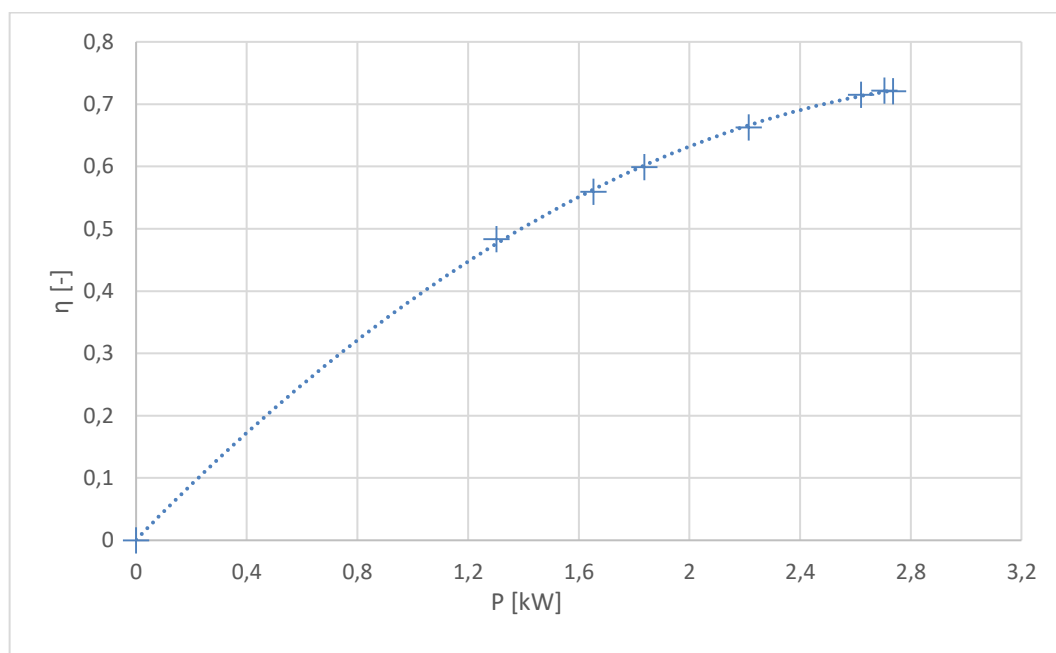
Program vytvořil několik závislostí na otáčkách, podle kterého se dá lépe vyčíst účinnost motoru, nebo momentová charakteristika. Pro přehlednost v textu je používána zkratka A pro motor s vypočítanými parametry, zkratka B pro motor s vypočtenými a následně upravenými parametry a zkratka C pro motor se zadanými parametry.

U všech tří modelů se uvažuje konstantní výkon na hřídeli, stejné mechanické ztráty, statorové a rotorové rozměry zubů. Rozměry zubů jsou stejné jako v technické dokumentaci jenom s tím rozdílem, že se liší hodnoty ve velikosti vnějšího a vnitřního průměru statoru, od kterého se odvíjí i jiná velikost průměrů rotoru a velikost hřídele. S rozdílnými hodnotami průměrů se změnil průřez drátu vinutí a tím i počet závitů v sérii. Pro stator byl nadefinován používaný typ oceli, protože v programu je knihovna materiálů, které se u nás často nepoužívají.

Navržený motor (A) má ze všech modelů nejhorší účinnost ($\eta=41\%$) a nemůže být využitelný v průmyslu. Tato malá účinnost je způsobena velkými ztrátami při běhu motoru, a proto byl motor experimentálně upraven několika způsoby na motor B, aby dosáhl větší účinnosti a mohl být porovnán se zadaným motorem C.

Délka svazku železa byla zmenšena o 27 % a tím se zvýšila účinnost o 14 %, protože navrhovaná délka motoru je zbytečně velká pro požadovaný konstantní výkon $P=1100$ W. Navrhovaná délka může být použita tehdy, jestliže bude požadován větší výkon. Na obr. 18 je znázorněna závislost účinnosti na výstupním výkonu, který ukazuje, že maximální účinnost motoru dosáhneme až při třikrát větším požadovaném výstupním výkonu.

Potřebná požadovaná změna byla zmenšení průměru vodičů hlavního a rozběhového vinutí, protože činitel plnění hlavního vinutí byl větší než jedna a rozběhového vinutí velmi velký, protože by navíjení závitů do drážek bylo velmi těžké, neefektivní a provedení není reálné. Požadovaný počet závitů je tak velký, že by se tolik závitů nevešlo do jedné drážky. Zmenšení průřezu vodičů bylo provedeno tak, aby se činitel obou vinutí přiblížil hodnotám činitele zadaného motoru. Byly navrženy nové průměry, které jsou o zhruba o 35 % větší než v motoru C s tím rozdílem, že motor C má dvě paralelní větve oproti motoru B a A, které mají jednu větev. Touto úpravou se zvětšila účinnost o 20 %. Se změnou průřezu vodiče se změnila i váha motoru.



Obr. 19. Závislost účinnosti na výstupním výkonu motoru A

Největší vliv na velikost účinnosti má velikost kapacity trvale připojeného kondenzátoru. Ve výpočtu je pro ukázkou vypočítána velikost rozběhového kondenzátoru, který se po rozběhu motoru rozpojí. Celý návrh motoru je uvažován s trvale připojeným kondenzátorem, kde tato úprava jde rozpoznat už z rozdělení drážek statoru na polovinu pro rozběhové a pro hlavní vinutí. Kapacita modelu A je převzata z technické dokumentace motoru C. Z porovnání těchto modelů jde

poznat, že každý motor má jiný záběrný moment. Podmínkou pro stanovení velikosti kondenzátoru je rovnost záběrných momentů modelu B a C. Požadovaný záběrný moment je $M=1,91$ Nm. Při uvažované velikosti kapacity $C=30$ μ F měl model B účinnost zhruba 75 %. Tato účinnost je lepší oproti modelu C, ale problémem byl malý záběrný moment, který nevyhovoval podmínce. Jediný způsob byl, aby se zvětšovala velikost kapacity. S rostoucí hodnotou kapacity běhového kondenzátoru roste velikost záběrného momentu a naopak. Velikost kondenzátoru modelu B byla experimentálně určena na $C=35,4$ μ F. Zvětšení velikosti kondenzátoru mělo negativní vliv na účinnost motoru, která klesla na 66 %. Tato hodnota kondenzátoru nebyla volena podle skutečných tabulkových hodnot kondenzátorů, které se vyrábí, ale jedná se jen o teoretickou hodnotu, aby bylo dosaženo rovnosti záběrných momentů zadaného (C) a navrhaného (B) motoru. V analytickém výpočtu je podle lit. [6] ověřena teoreticky velikost kondenzátoru pro dvě různé hodnoty odporů rozběhového a hlavního vinutí. Jeden výpočet je počítán s odpory z modelu (RMxprt) a druhý výpočet je počítán s odpory vypočtenými analyticky. Vypočtené hodnoty kondenzátorů se od sebe neliší a ve srovnání s experimentálně určenou velikostí kapacity se liší zhruba o 12 %, kde tato odchylka je způsobena nepřesnými výpočty, chybou simulace a dalšími nejistotami.

Poslední úprava, jak ještě dosáhnout lepší účinnosti, byla změna počtu závitů pomocného vinutí. Zmenšení počtu závitů pomocného vinutí zlepšilo účinnost motoru o necelé 3 %. Počet závitů klesl z 66 na 50 závitů s tím, že se zvýšil činitel plnění a srovnal se s velikostí činitele motoru C.

Těmito úpravami se celkově zlepšila účinnost motoru B oproti navrženému neupravenému motoru A. Zlepšením účinnosti se zmenšily jednotlivé ztráty a největší zmenšení ztrát se povedlo v mědi statoru a rotoru, které jsou v porovnání s motorem C srovnatelné a navrhnutý upravený motor (B) je schopen provozu. Všechny důležité parametry pro přehledné srovnání motorů jsou uvedeny v tab. 2 a podrobnější údaje jsou v příloze.

Tab. 2. Srovnání parametrů navrženého, navrženého upraveného a zadaného motoru

Parametry	Navržený motor A	Navržený upravený motor B	Zadaný motor C
Jmenovitý výstupní výkon [kW]	1,1	1,1	1,1
Jmenovité napětí [V]	230	230	230
Frekvence [Hz]	50	50	50
Počet pólů [W]	4	4	4
Mechanické ztráty – třením [W]	5	5	15

Mechanické ztráty – ventilační [W]	15	15	25
Běhový kondenzátor [μ F]	30	35,4	30
Počet statorových drážek	36	36	36
Vnější průměr statoru [mm]	136,15	136,15	135
Vnitřní průměr statoru [mm]	88,45	88,45	82,5
Vnější průměr rotoru [mm]	87,95	87,95	82,02
Vnitřní průměr rotoru [mm]	42,91	42,91	28,5
Délka svazku [mm]	104,21	70	70
Nejvyšší šířka zubu [mm]	4,64	4,64	4,12
Počet závitů hlavního vinutí	32	32	38
Počet závitů pomocného vinutí	66	50	63
Průměr drátu hlavního vinutí [mm]	1x1,296	1x0,985	2x0,63
Průměr drátu pomocného vinutí [mm]	1x0,757	1x0,773	2x0,475
Drátěný obal hlavního vinutí [mm]	0,068	0,059	0,049
Drátěný obal pomocného vinutí [mm]	0,041	0,052	0,044
Počet rotorových drážek	26	26	26
Velikost vzduchové mezery [mm]	0,25	0,25	0,24
Hmotnost hl. vinutí [kg]	1,23	0,58	0,54
Hmotnost po. vinutí [kg]	0,863	0,55	0,51
Celková hmotnost [kg]	11,39	7,64	7,78
Činitel plnění drážky hlavního vi. [%]	130	76	76
Činitel plnění drážky pomoc. vi. [%]	92	74	74
Statorový proud [A]	13,19	8,54	6,93
Proud v hlavním vinutí [A]	7,08	8,29	4,89
Proud v pomocném vinutí [A]	8,37	4,82	4,43
Odpor hlavního vinutí [Ω]	1,72	2,41	3,4
Odpor pomocného vinutí [Ω]	10,4	6,13	9,92
Ztráty v mědi statoru [W]	814,52	308,15	276,09
Ztráty mědi v rotoru [W]	555,88	28,45	39,11
Ztráty na kondenzátoru [W]	74,38	20,86	20,82
Ztráty v železe [W]	99,12	90,2	57,72
Celkové ztráty [W]	1565,91	469,37	415,09
Příkon [W]	2665	1569	1515
Výkon [W]	1100	1100	1100
Účinnost [%]	41	70	73
Mechanický moment na hřídeli [Nm]	7,11	7,16	7,21
Jmenovitý skluz [%]	1,65	2,19	2,8
cos φ	0,88	0,80	0,95

Jmenovitá rychlost hřídele [min ⁻¹]	1475	1467	1458
Záběrný moment [Nm]	2,33	1,91	1,91
Maximální moment [Nm]	19,10	18,56	14,43

5 MOŽNOSTI ZVÝŠENÍ ÚČINNOSTI JEDNOFÁZOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU

Každá část motoru má své typické vlastnosti a podíl na funkčnosti celého mechanismu. Všechny prvky konstrukce mají nadefinované vlastnosti. Při sebemenší změně mechanismu nebo typu materiálu použitého na části stroje změní provozní vlastnosti a stroj se může chovat jinak a může mít jiné výstupní parametry. Všechny tyto vlastnosti musí být pečlivě vybrány a každý výrobce se snaží dosáhnout co nejlepší účinnosti, výkonu motoru, a proto se snaží měnit a zkoušet nové materiály a součásti.

Tato kapitola se zabývá změnou různých úprav konstrukce motoru a je zde analyzován jejich vliv na jednotlivé druhy ztrát a zvýšením účinnosti zadaného jednofázového asynchronního motoru. Každá podkapitola je věnována jedné nebo více úpravám konstrukce a výsledky úprav jsou přehledně srovnány v tabulkách.

Všechny úpravy byly prováděny v programu ANSYS RMxprt na modelu zadaného motoru, nikoliv analyticky navrženého. Úpravy, které byly provedeny na modelu motoru jsou již dávno prakticky otestovány na různých motorech, a proto jsou tyto úpravy použity, zkombinovány a experimentálně vyzkoušeny na tomto modelu motoru. Prakticky byly testovány tyto úpravy: prodloužení magnetického obvodu a kruhů nakrátko, změna počtu závitů, průměru drátů, tvaru statorových a rotorových drážek, materiálu kruhů, tyčí a druhů plechů. Ve výsledcích jsou zmíněné ztráty v mědi statoru a rotoru, na kondenzátoru, v železe a celkové na které je kladen největší důraz. Největší ztráty jsou vždy v mědi statoru.

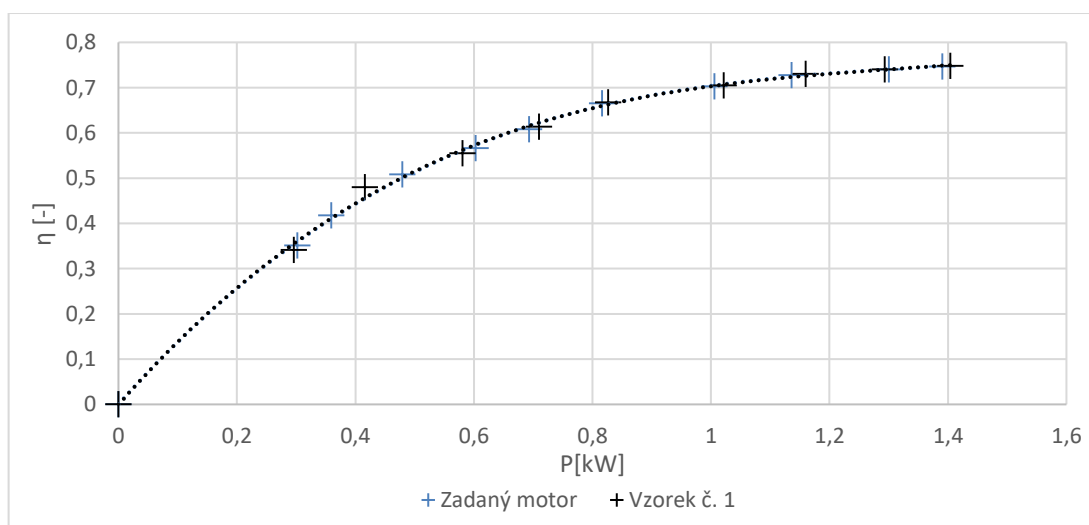
5.1 Vzorek č. 1: Prodloužení magnetického obvodu

Tento vzorek motoru má prodloužený magnetický obvod o 2 % původní délky zadaného motoru. Experimentálně bylo zjištěno, že prodloužením magnetického obvodu na aktuální délku $l=71,4$ mm se zvětší účinnost o 0,2 %, viz. Tab. 3. Snížením nebo překročením této hranice délky se bude účinnost zmenšovat, a proto prodloužení magnetického obvodu nezlepší závratně účinnost zadaného motoru. Účinnost tohoto vzorku motoru je $\eta=72,8$ %.

Celkové ztráty se u vzorku č. 1 snížily o 4 W, tj. o necelé 1 %. Největší úbytek ztrát je v mědi statoru, kde klesly o 8 W, tj. o 2,3 %. Tyto ztráty klesly díky snížení statorového proudu o 0,3 A, tj. o 2,5 %. Proud klesl proto, protože se zvýšil odpor hlavního i pomocného vinutí. Ztráty v mědi v rotoru se zvýšily o 3,5 W, tj. o 8,5 %. Ztráty na kondenzátoru se také zvýšily a ztráty v železe se snížily o necelé 2 W, tj. o 3,3 %. Prodloužením magnetického obvodu vedlo ke snížení sycení motoru. Účinník se zvýšil. Po této úpravě se snížil záběrný moment, a proto se musela zvýšit velikost běhového kondenzátoru na hodnotu $C=30,2$ μF . Snížení sycení motoru a pokles celkových ztrát způsobuje zvýšení účinníku o 0,02, tj. o 2 %. Hmotnost vzorku s porovnáním se zadaným motorem vzrostla o 0,09 kg, tj. o 1,1 %. Vyšší váha je zapříčiněna větším magnetickým obvodem. V Tab. 13 jsou zaznamenané veškeré údaje pro srovnání zadaného motoru se vzorkem č. 1.

Tab. 3. Srovnání jednotlivých druhů ztrát vzorku č. 1 se zadaným motorem

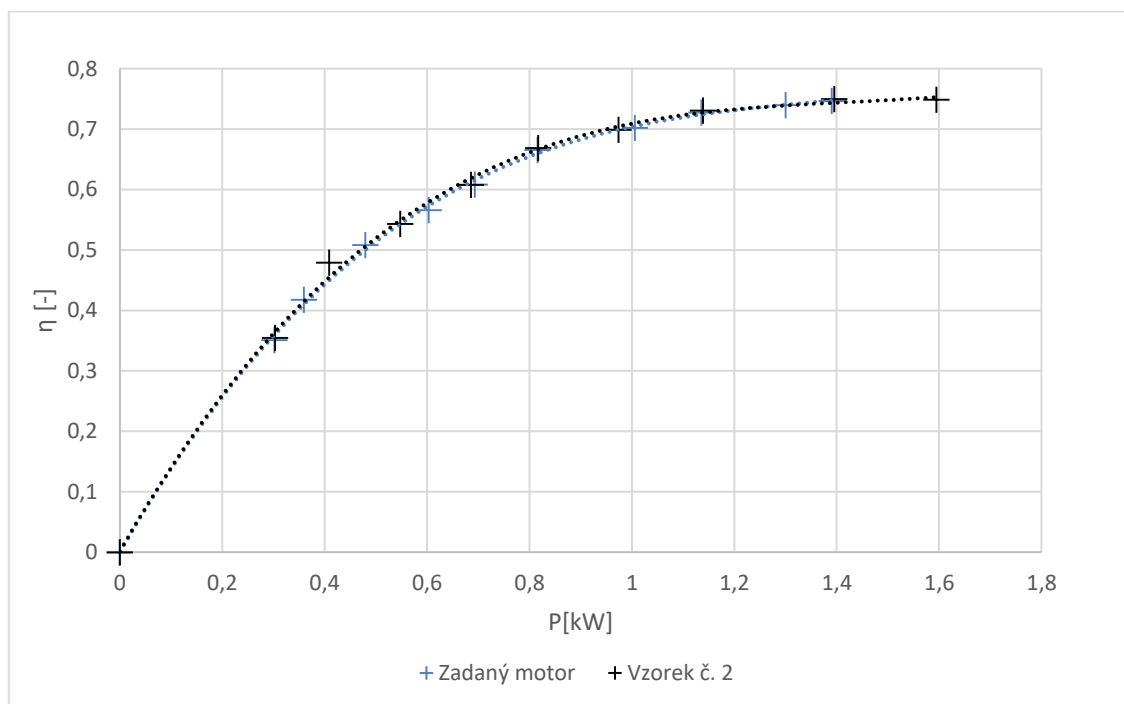
	η [%]	ΔP_{Cu1} [W]	ΔP_{Cu2} [W]	ΔP_C [W]	ΔP_{Fe} [W]	ΔP [W]
Zadaný motor	72,6	276,09	39,11	20,82	57,72	415,09
Vzorek č. 1	72,8	269,77	42,72	21,7	55,93	411,53
ΔX [%]	0,2	-6,32	8,5	4,1	-3,1	-0,9



Obr. 20. Porovnání účinnosti zadaného motoru a vzorku č. 1 – závislost účinnosti na výkonu

5.2 Vzorek č. 2: Změna velikosti průměru drátů hlavního a rozběhového vinutí

U tohoto vzorku byla změněna velikost průměru hlavního a rozběhového vinutí. U zadaného motoru byli navrženy dva dráty na jeden vodič s malým průměrem drátů. Hlavní vinutí drátu mělo průměr $2 \times 0,63$ mm a pomocné vinutí $2 \times 0,475$ mm. Změnou u tohoto vzorku bylo dát jeden drát na jeden vodič s větším průměrem. Průměr drátu hlavního vinutí byl zvolen na $1 \times 0,9$ mm a u pomocného vinutí na $1 \times 0,681$ mm. Se změnou průměrů drátu se změnila i velikost izolace. Při těchto změnách musel být dodržen činitel plnění pro hlavní vinutí 76 % a rozběhové vinutí 74 %. Touto úpravou se nezměnil činitel plnění drážky, ale tato změna byla udělána proto, protože při kombinaci s jinou úpravou zlepšuje účinnost motoru než původní použité drátů.



Obr. 21. Porovnání účinnosti zadaného motoru a vzorku č. 2 – závislost účinnosti na výkonu

Vzorek č. 2 má snížený odpor hlavního vinutí. Tato změna je dosažena díky zvýšení průměru vodiče pomocného a hlavního vinutí, kde odpor klesl o $0,4 \Omega$, tj. o 3 %. Jak je vidět v Tab. 4, účinnost tohoto vzorku motoru ve srovnání s účinností zadaného motoru je vyšší o 0,2 %. Celkové ztráty jsou menší o necelých 5 W, tj. o 1 %. Nejvíce se změnily Joulovy ztráty ve vinutí statoru, které klesly o 4 W, tj. o 1 %. Tyto ztráty nezpůsobily změnu proudu. Joulovy ztráty ve vinutí rotoru, ztráty na kondenzátoru a v železe se nepatrně změnila a výchyly jsou

způsobeny nepřesnostmi simulací. Celková hmotnost vzorku se zvětšila o 0,3 kg, tj. o 0,4 %, díky malému přidání mědi vodičů.

Tab. 4. Srovnání jednotlivých druhů ztrát vzorku č. 2 se zadaným motorem

	η [%]	ΔP_{Cu1} [W]	ΔP_{Cu2} [W]	ΔP_C [W]	ΔP_{Fe} [W]	ΔP [W]
Zadaný motor	72,6	276,09	39,11	20,82	57,72	415,09
Vzorek č. 2	72,8	271,16	39,17	20,95	57,87	410,51
ΔX [%]	0,2	-1,79	0,2	0,6	0,3	-1,1

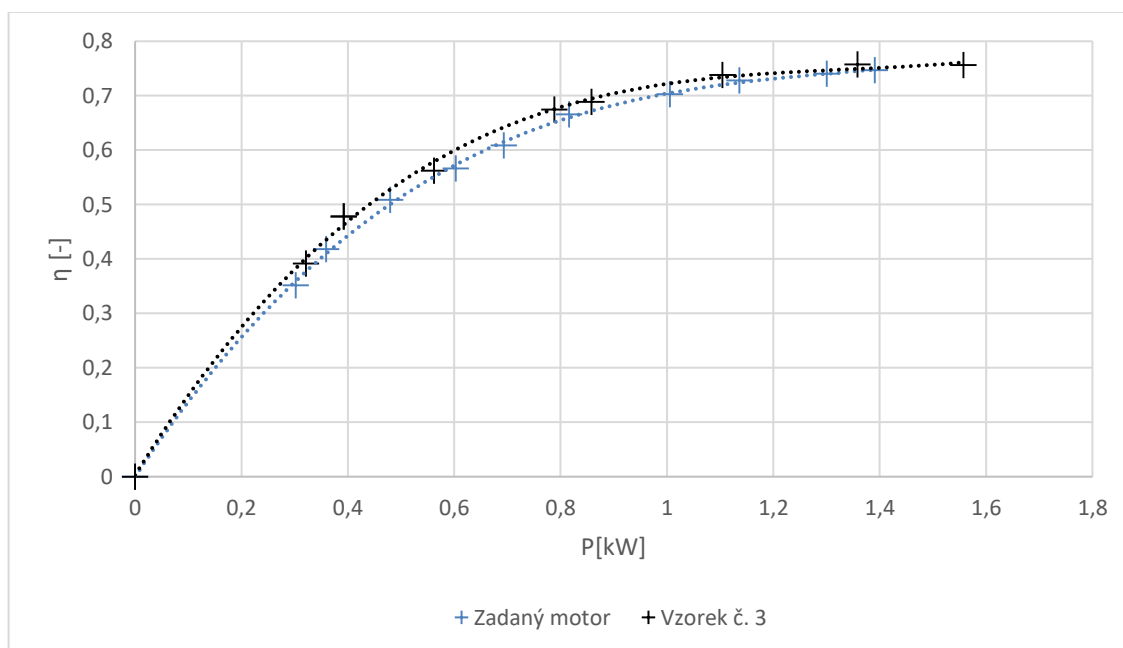
5.3 Vzorek č. 3: Změna velikosti průměru drátů hlavního a rozběhového vinutí, snížení počtu závitů

Vzorek č. 3 je podobný předešlému vzorku č. 2 s tou úpravou, že má snížený počet závitů u pomocného vinutí z 63 na 50 závitů. Snížením počtu závitů se výrazně zmenšil odpor pomocného vinutí a to o 3Ω , tj. o 40 %. Při zkoušení různého napájecího napětí bylo zjištěno, že při vyšším napětí je účinnost motoru větší. U vzorku motoru se musela zachovat jmenovitá hodnota napájecího napětí $U=230 \text{ V}$, a proto se změnil počet závitů a napájecí napětí zůstalo nezměněné. Změna počtu závitů motoru se projevila stejně jako při změně napájecího napětí a tyto změny byli vzájemně vykompenzovány.

Účinnost tohoto vzorku vzrostla zhruba o 2 % a celkové ztráty se snížily o 39 W, tj. o 10 %. Nejvíce se změnilly ztráty v mědi statoru a to o 35 W, tj. o 13 %. Díky zmenšením těchto ztrát klesl i statorový proud o 0,3 A, tj. o 5 %. Výrazné snížení statorového odporu má za následek snížení ztrát v mědi statoru. Snížení ztrát v železe, které klesly o 1,7 W, tj. o 2,9 %, bylo způsobeno přesycením motoru, a to díky snížení počtu závitů.

Tab. 5. Srovnání jednotlivých druhů ztrát vzorku č. 3 se zadaným motorem

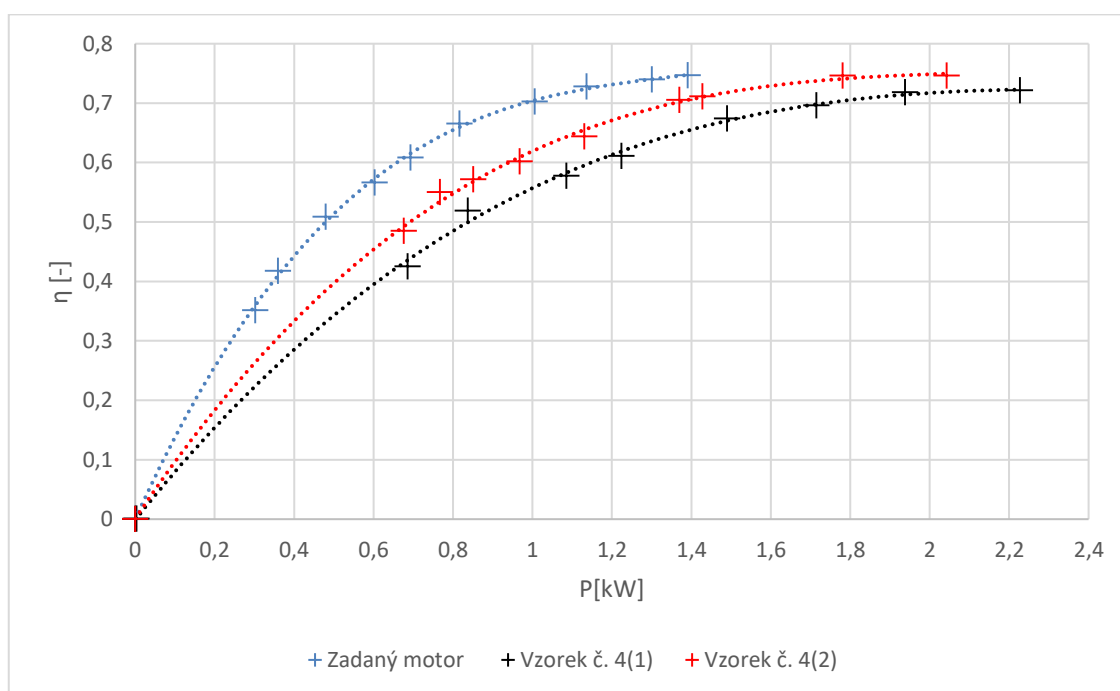
	η [%]	ΔP_{Cu1} [W]	ΔP_{Cu2} [W]	ΔP_C [W]	ΔP_{Fe} [W]	ΔP [W]
Zadaný motor	72,6	276,09	39,11	20,82	57,72	415,09
Vzorek č. 3	74,5	241,09	37,37	20,33	56,03	376,13
ΔX [%]	1,9	-12,7	-4,5	-2,4	-2,9	-10



Obr. 22. Porovnání účinnosti zadaného motoru a vzorku č. 3 – závislost účinnosti na výkonu

5.4 Vzorek č. 4: Změna druhu materiálu kruhů a tyčí

Klec, která se skládá ze spojovacích kruhů a tyčí, je v tomto vzorku z mědi. Byly vytvořeny dva vzorky. První vzorek má průměry drátů a počet závitů totožné se zadaným motorem a druhý vzorek má upravené průměry drátu a počet závitů podle vzorku č. 3. Vzorek s neupravenými průměry drátů a počtem závitů má účinnost $\eta=63\%$ a druhý vzorek má lepší účinnost než ten první. Účinnost druhého vzorku je $\eta=65\%$. Oba vzorky mají zhoršenou účinnost oproti zadanému motoru. Tato úprava je neefektivní. U třífázového motoru by tato úprava byla efektivní, jelikož tento motor je jednofázový a pro rozběh potřebuje kondenzátor, který ovlivňuje účinnost tohoto motoru. U tohoto vzorku se uvažuje, že kondenzátor je trvale připojený. Tato úprava by byla možná efektivní, kdyby se zapojily dva kondenzátory, a to jeden pro rozběh a druhý pro trvalé připojení.



Obr. 23. Porovnání účinnosti zadaného motoru a vzorku č. 4(1, 2) – závislost účinnosti na výkonu

V Tab. 6 je vidět, že celkové ztráty obou vzorků jsou přes 600 W, tj. 33 %. Největší ztráty jsou v mědi statoru, kde druhý vzorek má menší ztráty oproti prvnímu vzorku. Všechny avizované ztráty se oproti zadanému motoru výrazně zvětšily a tím zhoršily účinnost vzorku č. 4, jak vzorek s upraveným počtem závitů a průřezem vodičů, tak i neupravený vzorek (Vzorek č. 4(1)). U vzorku č. 4 nebyla dosažena požadovaná velikost záběrného momentu $M_z=1,91\text{Nm}$. Záběrný moment se mění současně s hodnotou běhového kondenzátoru. Čím vyšší velikost trvale připojeného kondenzátoru, tím vyšší velikost záběrného momentu, ale menší účinnost motoru. Dosažená velikost záběrného momentu tohoto vzorku

($M_Z=1,64$ Nm) je nejvýše maximálně dosažená, protože při zvětšování velikost kondenzátoru nad hodnotu $C=50$ μ F není možné už motor rozběhnout a účinnost je pořád malá. Účinník se zvětšil u obou vzorků. V Tab. 14 jsou podrobnější údaje o druhém upraveném vzorku (Vzorek č. 4(2)) s lepší účinností pro srovnání se zadaným motorem.

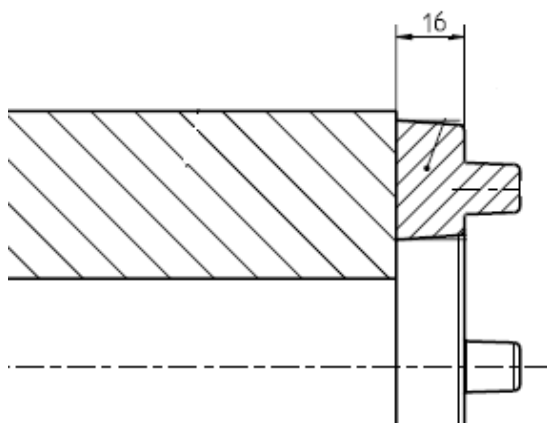
Celkové ztráty vzorku č. 4 s účinností $\eta=65$ % jsou větší než celkové ztráty zadaného motoru a to o 185 W, tj. o 30,8 %. Největší ztráty byly ztráty v mědi statoru, kde byly tyto ztráty větší skoro o 150 W, tj. o 35,2 %. Nejmenší ztráty tohoto vzorku byly ztráty v železe, které vzrostly o 1 W, tj. o 1,8 %. Všechny ztráty jsou uvedené v Tab. 6 a porovnány se zadaným modelem motoru.

Tab. 6. Srovnání jednotlivých druhů ztrát vzorku č. 4 se zadaným motorem

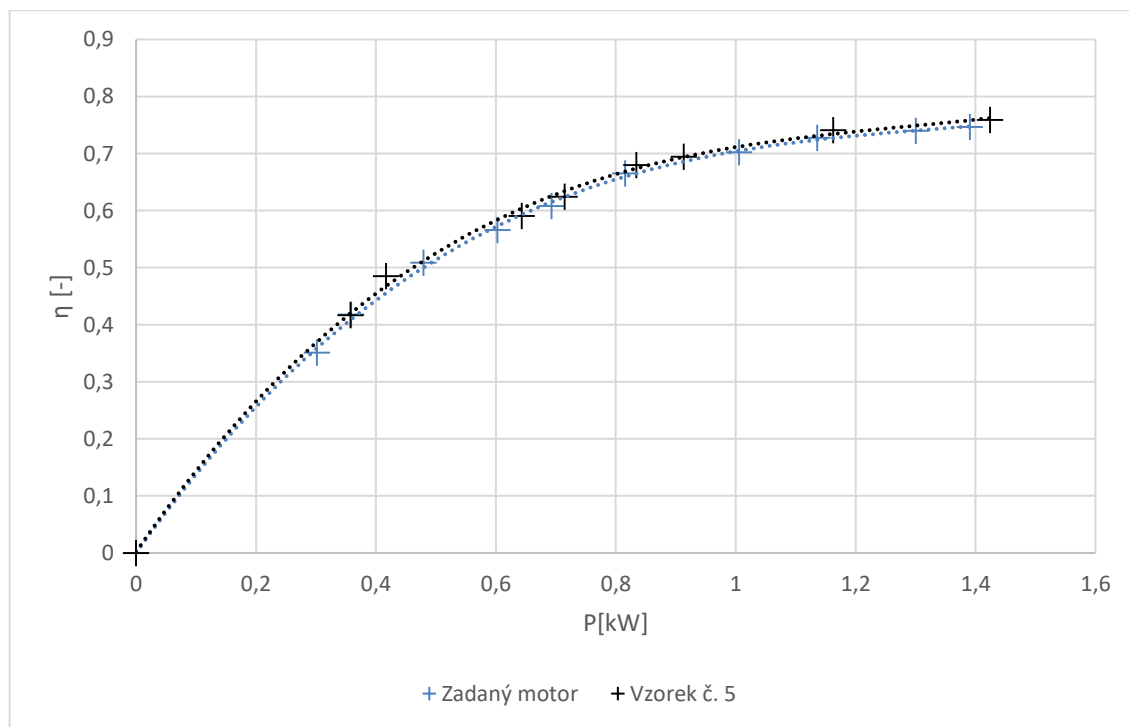
	η [%]	ΔP_{Cu1} [W]	ΔP_{Cu2} [W]	ΔP_C [W]	ΔP_{Fe} [W]	ΔP [W]
Zadaný motor	72,6	276,09	39,11	20,82	57,72	415,09
Vzorek č. 4(1)	63,9	473,06	51,16	38,44	63,76	648,6
ΔX [%]	-8,7	41,6	26,6	45,8	9,5	36
Vzorek č. 4(2)	64,7	425,7	58,03	35,56	58,77	600,2
ΔX [%]	-7,9	35,2	32,6	41,5	1,8	30,8

5.5 Vzorek č. 5: Změna šířky rotorového kruhu nakrátko, změna průměru drátů, snížení počtu závitů

Vzorek č. 5 má změněný průměr drátu hlavního a pomocného vinutí. Hlavní vinutí má průměr 1x0,902 a pomocné vinutí má průměr 1x0,769 se sníženým počtem závitů. Tato úprava je u skoro všech vzorků obdobná. Další změnou u tohoto vzorku je prodloužení šířky koncového kroužku u rotoru, která je vidět na obr 24. Šířka kroužku byla prodloužena o 5 mm na hodnotu $h=16$ mm. Účinnost vzorku se zlepšila o 1,5 % se srovnáním se zadaným motorem na 74 % - viz Tab. 7.



Obr. 24. Koncový kroužek rotoru



Obr. 25. Porovnání účinnosti zadaného motoru a vzorku č. 5 – závislost účinnosti na výkonu

Celkové ztráty se zmenšily o 30,5 W, tj. o 7,3 %. Největší zmenšení ztrát bylo u ztrát v mědi statoru, kde se Joulovy ztráty zmenšily o 27,5W, tedy o 10 %. Joulovy ztráty v rotoru a ztráty v železe se také zmenšily, kromě ztrát na kondenzátoru, které se zvětšily o 1 W, tj. 3,7 %. Účinník se zvětšil.

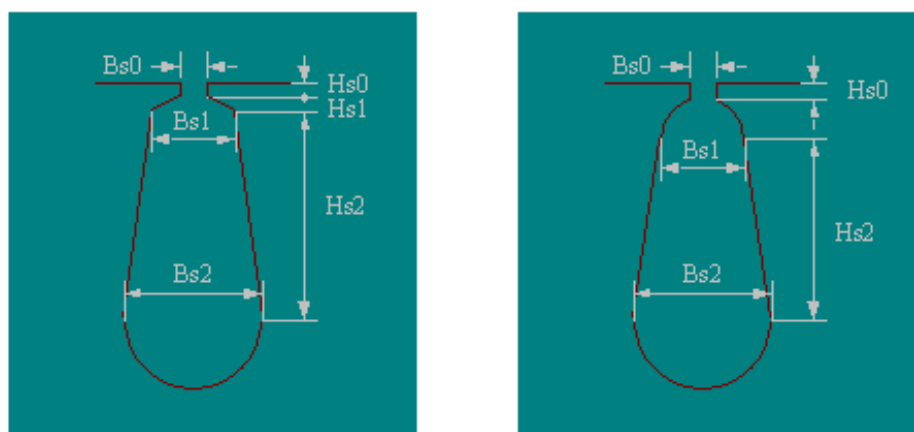
Tab. 7. Srovnání jednotlivých druhů ztrát vzorku č. 5 se zadaným motorem

	η [%]	ΔP_{Cu1} [W]	ΔP_{Cu2} [W]	ΔP_C [W]	ΔP_{Fe} [W]	ΔP [W]
Zadaný motor	72,6	276,09	39,11	20,82	57,72	415,09
Vzorek č. 5	74,07	248,57	36,96	21,59	56,09	384,62
ΔX [%]	1,44	-10	-5,5	3,6	-2,8	-7,3

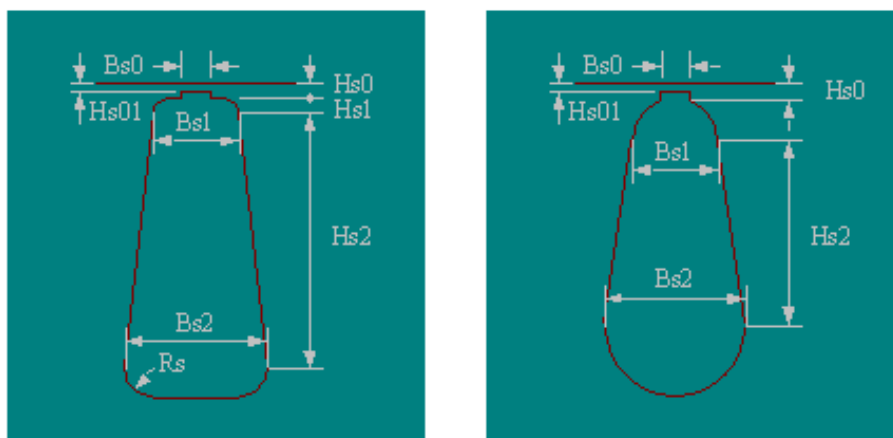
5.6 Vzorek č. 6: Změna tvaru drážek, změna průměru drátů, snížení počtu závitů

Tento vzorek má statorové i rotorové drážky upraveny z hlediska účinnosti, upravené průměry drátu hlavního a pomocného vinutí a snížený počet závitů pomocného vinutí. Počet závitů a průměry drátů hlavního a pomocného vinutí je stejný jako u vzorku č. 3. Úprava tvaru drážek byla optimalizována pomocí programu ANSYS. Pomocí analytického výpočtu v programu RMxpert, který je součástí balíčku ANSYS, byl určen nejvhodnější tvar drážek, aby byla účinnost motoru co největší.

Při měnění tvaru drážek nesměla být překročena maximální hranice plnění drážek. Maximální hodnota činitele plnění u statorové drážky je 76 % a u rotorové drážky 74 %, kde tyto hodnoty jsou u tohoto vzorku dodrženy. Výsledná úprava tvaru drážek je vidět na obr. 26 (vlevo) a na obr. 27 (vlevo), kde jsou srovnány původní tvary drážek s novými navrhnutými tvary. Výsledné rozměry drážek jsou v Tab. 8. Optimalizovaný tvar statorové drážky je oproti původnímu tvaru menší o 2 %. Místo zaoblené hrany původní drážky je přidána výška $H_{s1}=0,6$ mm, která zaoblenou hranu nahrazuje zkosenou hranou a snižuje objem optimalizované drážky statoru. U rotorové drážky se změnil začátek i konec tvaru drážek, kde zaoblené hrany jsou nahrazeny rovinnými hranami a konce spojených hran jsou zaobleny čtvrtkruhy s malým průřezem. Tato změna zvětšila objem optimalizované drážky o 9 % oproti původnímu tvaru drážek zadaného motoru.



Obr. 26. Původní tvar (vpravo) drážky statoru zadaného motoru a optimalizovaný tvar (vlevo) drážky statoru vzorku č. 6



Obr. 27. Původní tvar (vpravo) drážky rotoru zadaného motoru a optimalizovaný tvar (vlevo) drážky rotoru vzorku č. 6

Střední indukce v satorové drážce se zvětšila, protože se snížila velikost šířky zubu satoru (zhruba o 0,2 mm), ale indukce ve vzduchové mezeře se nezměnila. Střední indukce ve satorové drážce se zvětšila o 0,12 T, tj. o 6,3 %. Se změnou indukce, která se ve satorové drážce zvětšila, klesla indukce jha satoru a jho rotoru. Střední indukce v rotorové drážce se zmenšila, což je způsobeno zvětšením šířky zubu rotoru. Střední indukce se zmenšila o 0,16 T, tj. 8,3 %.

Tab. 8. Srovnání rozměrů satorové a rotorové drážky

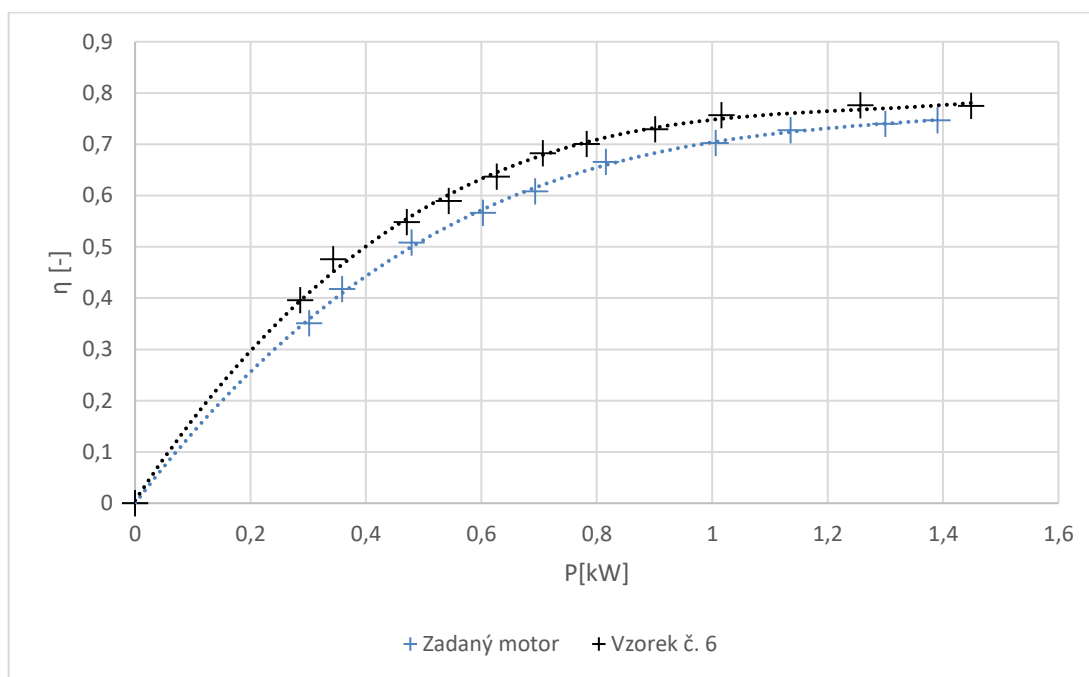
	Zadaný motor		Vzorek č. 6	
	Sator	Rotor	Sator	Rotor
H_{s0} [mm]	0,8	0,5	0,8	0,5
H_{s1} [mm]	-	-	0,6	0,2
H_{s2} [mm]	10,3	8,7	9,7	8,7
B_{s0} [mm]	2,5	0,8	2,5	0,8
B_{s1} [mm]	3,4	4,1	3,7	4,1
B_{s2} [mm]	5,3	2	5,4	2
R_s [mm]	-	-	-	2,5
Nejvyšší šířka zubu [mm]	4,1	-	3,8	-
Spodní šířka zubu [mm]	4,0	-	3,8	-

Jak ukazuje Tab. 9, účinnost tohoto vzorku vzrostla na 76,4 % ve srovnání se zadaným motorem, tj. o 3,8 %. Celkové ztráty se snížily o 76 W, tj. o 18,3 %. Nejvýrazněji se změnil Joulový ztráty ve vinutí satoru, které klesly o 70 W, tj. o 25 %. Tyto ztráty výrazně klesly díky satorovému proudu, který rovněž klesl

i díky menšímu statorovému odporu. Ztráty v železe klesly o 4,6 W, což potvrdilo očekávání. Ztráty na kondenzátoru také klesly a to o 3 W, tj. o 14,9 %. Naopak Joulovy ztráty v rotoru se zvýšily o 3,5 %. Účinník se zvětšil.

Tab. 9. Srovnání jednotlivých druhů ztrát vzorku č. 6 se zadaným motorem

	η [%]	ΔP_{Cu1} [W]	ΔP_{Cu2} [W]	ΔP_C [W]	ΔP_{Fe} [W]	ΔP [W]
Zadaný motor	72,6	276,09	39,11	20,82	57,72	415,09
Vzorek č. 6	76,4	206,82	40,55	17,71	53,09	339,24
ΔX [%]	3,8	-25,1	3,5	-14,9	-8	-18,3

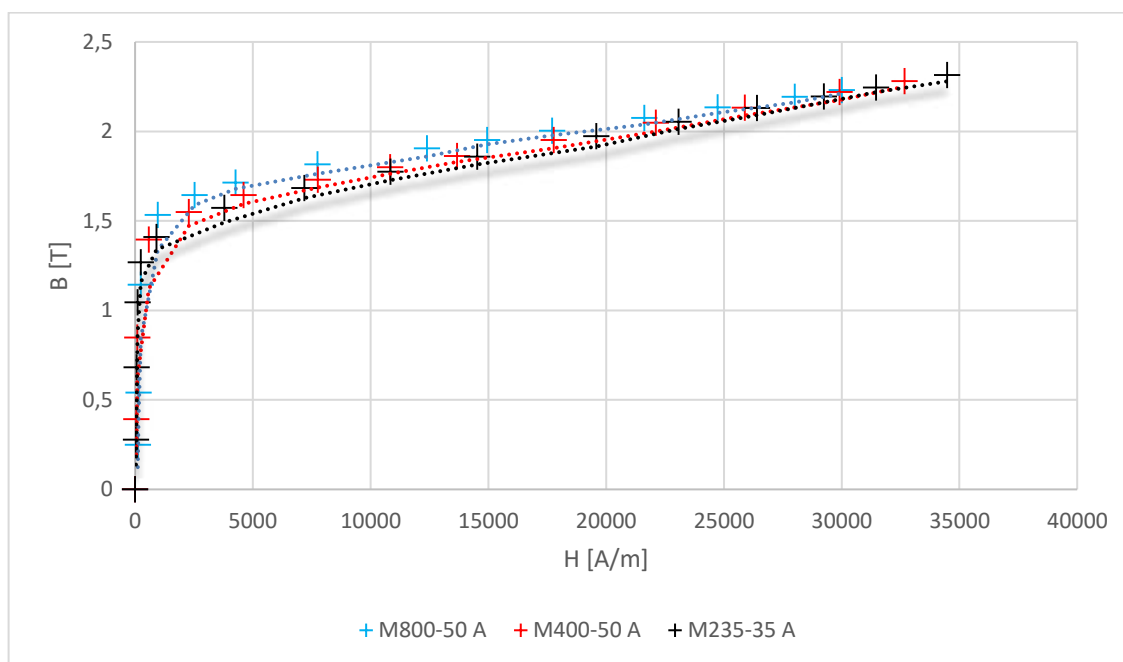


Obr. 28. Porovnání účinnosti zadaného motoru a vzorku č. 6 – závislost účinnosti na výkonu

5.7 Vzorek č. 7 a, b: Změna druhu materiálu plechů, změna průměru drátů, změna počtu závitů

U všech dosavadních vzorků, kde byl změněn průřez drátu oproti zadanému motoru, má tento vzorek jiný průřez drátů i počet závitů. Použitý průřez a počet závitů, který byl použit u vzorku č. 3, nebyl efektivní a účinnost byla malá, protože byl změněn druh materiálu plechů. U všech vzorků je používán standardní plech M800-50 A. U vzorku č. 7 byly vytvořeny dva modely motorů, a to s použitím jiného druhu plechů. U prvního vzorku (7 a) byl použit druh materiálu plechů M400-50 A, který se v poslední době začíná využívat častěji než plechy M800-50 A a u druhého vzorku (7 b) byl použit druh materiálu plechů M235-35 A. Průměr drátu hlavního vinutí byl navržen na velikost $1 \times 0,879$ mm a průměr pomocného vinutí na velikost $1 \times 0,728$, kde tyto průřezy byly použity u obou vzorků. Při návrhu průměru byla dodržena maximální hranice činitele plnění drážky a zvolen počet závitů u hlavního vinutí na 40 závitů a u pomocného vinutí na 55 závitů.

Použité plechy mají výrazně nižší měrné ztráty než plechy M800-50 A použité u zadaného motoru. Nevýhodou těchto plechů je níže položené koleno BH křivky – viz Obr. 22. Níže položené koleno BH křivek může způsobit nárůst magnetizačního proudu.



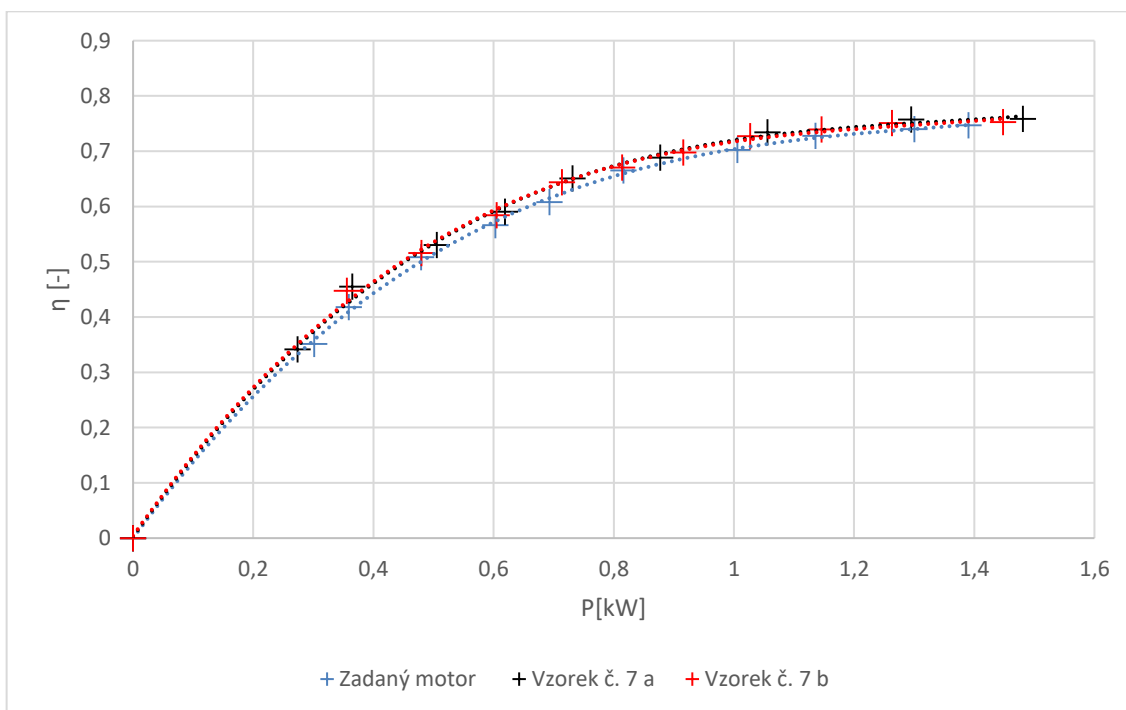
Obr. 29. Porovnání BH křivek plechů M800-50 A, M400-50 A a M235-35 A

Účinnost vzorku s plechy M400-50 A má lepší účinnost než motor s plechy M235-35 A a to o 0,2 %, což je ve srovnání s účinností se zadaným motorem zanedbatelné a tato změna zlepšila účinnost u obou vzorků s jinými plechy

o 1,1-1,3 %. Celkové ztráty vzorku s plechy M400-50 A klesly o 26 W, tj. o 6,3 %. Joulový ztráty ve vinutí statoru klesly o 22 W, tj. o 8 %. Při snížení těchto ztrát se zmenšil statorový proud o 0,3 A, tj. o 4,3 %. K poklesu těchto ztrát došlo díky snížení odporu statorového vinutí – viz Tab. 7 a. Joulový ztráty v rotoru se zvýšily o 3 W, tj. o 7,1 %. Zvýšení těchto ztrát má za příčinu zvýšení skluzu vzorku č. 7 a. Ztráty v železe klesly o 6,2 W, tj. o 10,7 %. Ztráty v železe se snížily díky menším měrným ztrátám plechů M400-50 A. Účinnost tohoto vzorku se zvýšil, což způsobilo zmenšení celkových ztrát.

Tab. 10. Srovnání jednotlivých druhů ztrát vzorku č. 7 a, b se zadaným motorem

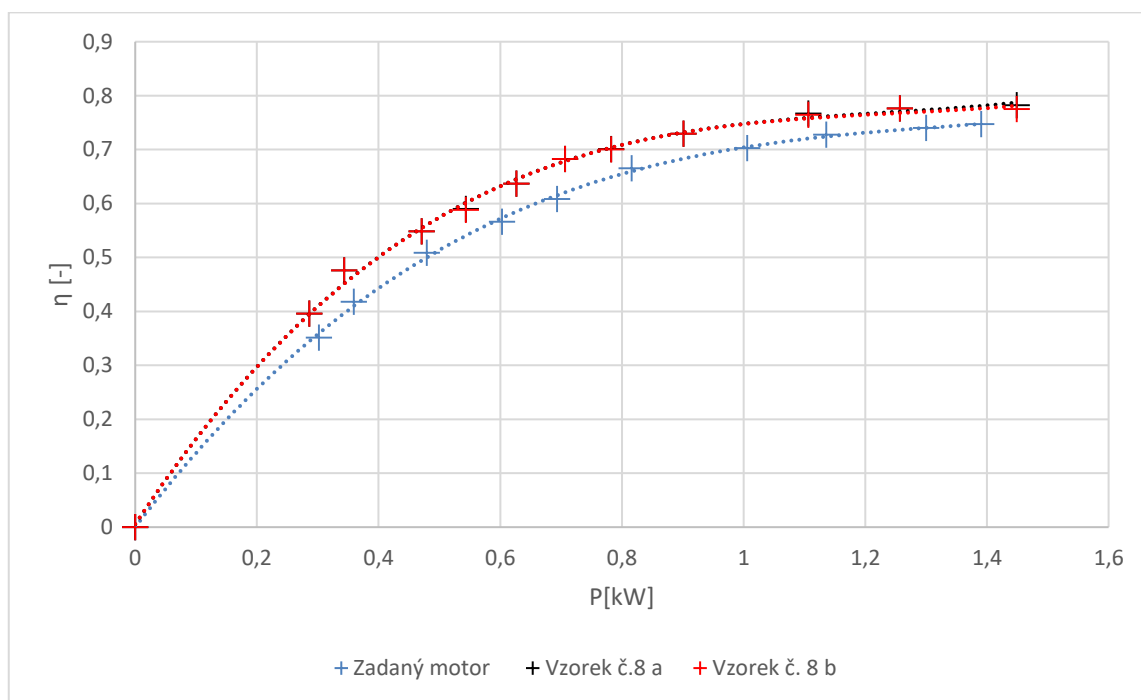
	η [%]	ΔP_{Cu1} [W]	ΔP_{Cu2} [W]	ΔP_C [W]	ΔP_{Fe} [W]	ΔP [W]
Zadaný motor	72,6	276,09	39,11	20,82	57,72	415,09
Vzorek č. 7 a	73,9	253,96	42,11	20,22	51,53	388,98
ΔX [%]	1,3	-8	7,1	-2,9	-10,7	-6,3
Vzorek č. 7 b	73,7	260,57	41,03	19,4	50,7	392,8
ΔX [%]	1,1	-5,6	4,7	-6,8	-12,2	-5,7



Obr. 30. Porovnání účinnosti zadaného motoru a vzorku č. 7(a, b) – závislost účinnosti na výkonu

5.8 Vzorek č. 8 a, b: Změna tvaru drážek, změna druhu materiálu plechů, změna průměru drátů, změna počtu závitů

Magnetický obvod těchto vzorků je vyroben z plechů M400-50 A a M235-35 A, a proto se uvažují dva vzorky s těmito plechy (vzorek č. 8 a, vzorek č. 8 b). Průřez satorové vinutí mají oba vzorky stejné, tj. hlavní vinutí má průřez $1 \times 0,86$ mm a pomocné vinutí $1 \times 0,717$ mm. Hlavní vinutí má 40 závitů a pomocné vinutí 55 závitů. Tvar drážek je optimalizován stejně jako u vzorku č. 6. Tento vzorek je vytvořen tak, že všechny účinné úpravy u předešlých vzorků jsou použity u tohoto vzorku. Účinnost u těchto vzorků je jedna z nejvyšších ve srovnání s jinými vzorky.



Obr. 31. Porovnání účinnosti zadaného motoru a vzorku č. 8(a, b) – závislost účinnosti na výkonu

Vzorek s plechy M400-50 A má o něco lepší účinnost než vzorek s plechy M235-35 A, tj. o 0,3 %. Celkové ztráty vzorku s plechy M400-50 A se zmenšily s porovnáním se zadaným motorem o 81 W, tj. o 19,5 %. Největší úbytek ztrát nastal u Joulových ztrát ve vinutí statoru, které klesly o 75 W, tj. o 26,9 %. K poklesu těchto ztrát došlo ke snížení odporu statorového vinutí a díky tomu se zmenšil i statorový proud. Statorový proud klesl o 0,5 A, tj. o 7,2 %. Ztráty v železe se snížily o 11 W, tj. o 18,7 %. Ke snížení těchto ztrát došlo díky nižším

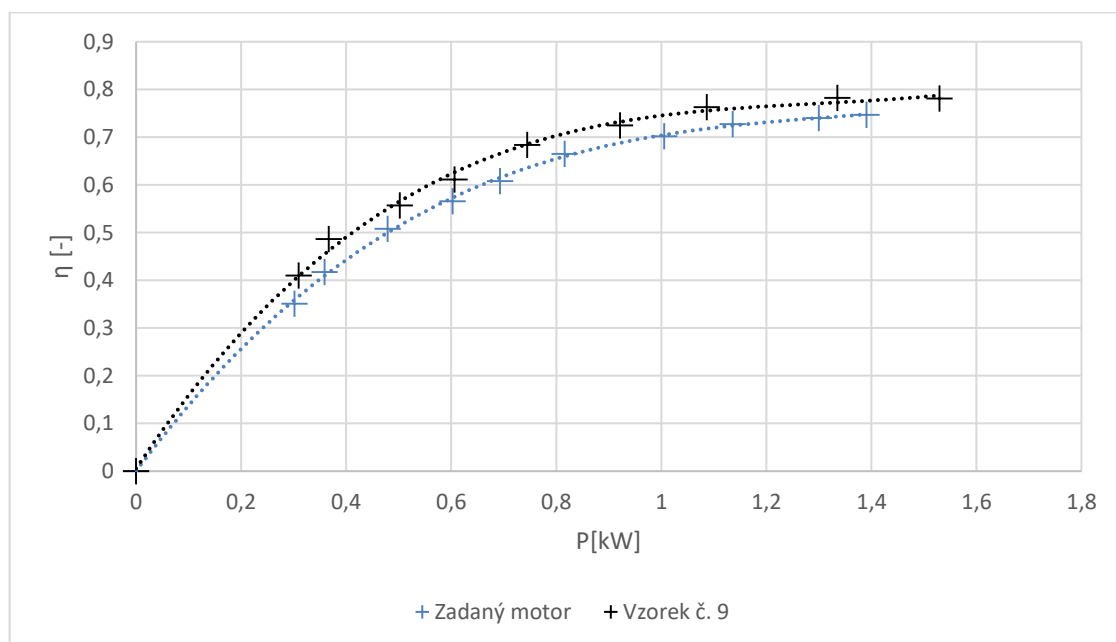
měrným ztrátám použitých plechů. Ztráty na kondenzátoru klesly o 3,3 W, tj. o 16 %. Účinník se zvýšil.

Tab. 11. Srovnání jednotlivých druhů ztrát vzorku č. 8 a, b se zadaným motorem

	η [%]	ΔP_{Cu1} [W]	ΔP_{Cu2} [W]	ΔP_C [W]	ΔP_{Fe} [W]	ΔP [W]
Zadaný motor	72,6	276,09	39,11	20,82	57,72	415,09
Vzorek č. 8 a	76,7	201,84	46,91	17,48	46,91	334,07
ΔX [%]	4,1	-26,9	16,6	-16	-18,7	-19,5
Vzorek č. 8 b	76,4	210,62	45,54	16,44	46,39	339,83
ΔX [%]	3,8	-23,7	14,1	-21	-19,6	-18,1

5.9 Vzorek č. 9 Změna tvaru drážek, změna průměru drátů, snížení počtu závitů, šířka koncového kroužku, prodloužení magnetického obvodu

U tohoto vzorku je stejně optimalizovaný tvar drážek jako u vzorku č. 6. Magnetický obvod vzorku je rovněž vyroben z plechů M800-50 A jako u zadaného motoru. S použitím těchto plechů má statorové vinutí jiný průměr než vzorek č. 7 a 8. Průměr hlavního vinutí je $1 \times 0,885$ s 38 závitů a průměr pomocného vinutí je $1 \times 0,755$ s 50 závitů. Další úpravou je prodloužení magnetického obvodu o 1,4 mm podobně jako u vzorku č. 1 a prodloužení šířky koncového kroužku o 5 mm (viz vzorek č.5). Všechny tyto úpravy jsou použity u předešlých vzorků a tento vzorek má všechny úpravy, které vedly ke zvýšení účinností u předešlých vzorků.



Obr. 32. Porovnání účinnosti zadaného motoru a vzorku č. 6 – závislost účinnosti na výkonu

Celková účinnost vzorku je 76,3 %, tedy s porovnáním se zadaným motorem je o 3,7 % vyšší a je jedna z nejvyšších účinností všech zkoumaných vzorků. Celkové ztráty jsou menší o 75 W, tj. o 18,1 %. Nejvyšší ztráty u tohoto vzorku jsou Joulovy ztráty, které klesly o 66 W, tj. o 23,7 %. Tento úbytek byl způsoben díky značnému snížení statorového odporu a snížení statorového proudu, který klesl o 0,62 A, tj. o 9 %. Ztráty v železe se zmenšily o 11,5 W, tj. o 19,6 %. Snížily se i ztráty na kondenzátoru, které klesly o 4,4 W, tj. o 21 %. Jediné zvýšení u uvažovaných ztrát nastal v mědi rotoru, kde se zvýšily o 6,4 W,

tj. o 14,1 %. Všechny uvažované ztráty jsou porovnány v Tab. 12. Účinník motoru se zvýšil.

Tab. 12. Srovnání jednotlivých druhů ztrát vzorku č. 9 se zadaným motorem

	η [%]	ΔP_{Cu1} [W]	ΔP_{Cu2} [W]	ΔP_C [W]	ΔP_{Fe} [W]	ΔP [W]
Zadaný motor	72,6	276,09	39,11	20,82	57,72	415,09
Vzorek č. 9	76,3	210,62	45,54	16,44	46,39	339,83
ΔX [%]	3,7	-23,7	14,1	-21	-19,6	-18,1

5.10 Vyhodnocení jednotlivých úprav

Přehled důležitých parametrů, které se změnil, všech uvažovaných vzorků jsou uvedeny v Tab. 13-15. Z výše uvedených rozborů jednotlivých vzorků jde analyzovat, že každý vzorek má jiné ztráty. U některých vzorků jsou jednotlivé ztráty tak velké, že nejdou zanedbat a mají velký vliv na účinnost svého vzorku. Celkové rozdíly jsou malé (několik wattů), ale vzhledem k malému výkonu zadaného motoru a všech vzorků mohou mít velký vliv. Všechny vzorky jsou navrhovány tak, aby měly stejný záběrný moment, který se nastavoval pomocí velikosti trvale připojeného kondenzátoru.

Nejvyšší účinnost má vzorek č. 8 a, který má magnetický obvod z plechů M400-50 A. Má optimalizovaný tvar drážek, snížený počet závitů u pomocného vinutí a zvýšený počet závitů u hlavního vinutí a změněný průměr u obou uvedených vinutí. Účinnost tohoto vzorku je vyšší o 4,1 % než účinnost zadaného motoru. Naopak nejmenší účinnost je u vzorku č. 4, kde se změnil materiál kruhů a tyčí. Původní klec z hliníku byla nahrazena klecí z mědi, která účinnost vzorku zhoršila o 8 % oproti zadanému motoru, který měl účinnost 72,6 %. Tato úprava je neefektivní, protože problém u jednofázových motorů je rozběhový kondenzátor. Tento motor byl navržen s trvale připojeným kondenzátorem a úprava by byla možná efektivní, kdyby se k trvale připojenému kondenzátoru připojil ještě jeden kondenzátor určený jenom pro rozběh. Nejnižší proud byl u vzorku č. 8 a (plechy M400-50 A, optimalizovaný tvar drážek, změna průřezů drátů a drážek), se kterým souvisí účinník, který byl u tohoto vzorku nejvyšší. Naopak nejvyšší proud byl u vzorku č. 2 (změna průřezu drátu), kde se nepatrně změnila účinnost ve srovnání se zadaným motorem a účinník byl nejmenší (stejný jako u zadaného motoru).

Nejčastější úpravou u vzorků byla změna počtu závitů a průměru drátů. Tyto změny jsou provedeny u vzorku č. 3 bez jiných změn na konstrukci motoru. Změna měla vliv na zvětšení účinnosti o 1,9 % a na zmenšení Joulových ztrát ve statoru, které tvoří největší část celkových ztrát motoru. Zvýšením průměru drátů se zmenšil u všech vzorků statorový proud a odpor. Snížením počtu závitů souvisí s vyšším sycením motoru.

Největší vliv na zvětšení účinnosti motoru byla změna tvaru drážek a jejich optimalizace, která je ukázána u vzorku č. 6 a nejmenší vliv na zvětšení účinnosti motoru bylo prodloužení magnetického obvodu u vzorku č. 1.

Plech M400-50 A, M235-35 A byly použity, protože mají nižší měrné ztráty než použité plechy M800-50 A u zadaného motoru. Díky tomu došlo ke zmenšení ztrát v železe, které jsou nejrazantnější u vzorku č. 7 a 8. Nevýhodou použitých plechů je níže položené koleno BH křivky podle obr. 22. Další nevýhodou je jejich vyšší nákladová cena. Samotný materiál je dražší kvůli snížení měrných ztrát a pro výrobu jednoho motoru je potřeba více plechů, protože jsou tenčí.

Tab. 13. Parametry vzorků č. 1 – č. 3

Parametry	Zadaný motor	Vzorek č. 1	Vzorek č. 2	Vzorek č. 3
Běhový kondenzátor [μF]	30	30,2	30,1	40,4
Délka svazku [mm]	70	71,4	70	70
Počet závitů hlavního vinutí	38	38	38	38
Počet závitů pomocného vinutí	63	63	63	50
Průměr drátu hlavního vinutí [mm]	2x0,63	2x0,63	1x0,9	1x0,9
Průměr drátu pomocného vinutí [mm]	2x0,475	2x0,475	1x0,681	1x0,771
Odpor hlavního vinutí [Ω]	3,4	3,9	3,33	3,33
Odpor pomocného vinutí [Ω]	9,92	10,73	9,59	5,98
Šířka koncového kroužku [mm]	11	11	11	11
Hmotnost hl. vinutí [kg]	0,54	0,55	0,55	0,55
Hmotnost po. vinutí [kg]	0,51	0,52	0,53	0,53
Celková hmotnost [kg]	7,78	7,87	7,81	7,82
Typ plechů – výr. označení	M800 - 50 A	M800 - 50 A	M800 - 50 A	M800 - 50 A
Činitel plnění drážky hlavního vi. [%]	76	76	76	76
Činitel plnění drážky pomoc. Vi. [%]	74	74	74	74
Statorový proud [A]	6,93	6,76	6,92	6,62
Proud v hlavním vinutí [A]	4,89	4,31	4,9	5,11
Proud v pomocném vinutí [A]	4,43	4,54	4,45	5,08
Ztráty v mědi statoru [W]	276,09	269,77	271,16	241,09
Ztráty mědi v rotoru [W]	39,11	42,72	39,17	37,37
Ztráty na kondenzátoru [W]	20,82	21,7	20,95	20,33
Ztráty v železe [W]	57,72	55,93	57,87	56,03
Celkové ztráty [W]	415,09	411,53	410,51	376,13
Příkon [W]	1515	1512,19	1510,8	1476,23
Výkon [W]	1100	1100	1100	1100
Účinnost [%]	72,6	72,8	72,8	74,5
Mechanický moment na hřídeli [Nm]	7,21	7,2	7,21	7,21
Jmenovitý skluz [%]	2,8	2,7	2,8	2,9
$\cos\varphi$	0,95	0,97	0,95	0,97
Jmenovitá rychlost hřídele [min^{-1}]	1458	1459	1458	1456
Záběrný moment [Nm]	1,91	1,91	1,91	1,91
Maximální moment [Nm]	14,43	14,39	14,54	14,4

Tab. 14. Parametry vzorků č. 4 – č. 7 a

Parametry	Vzorek č. 4	Vzorek č. 5	Vzorek č. 6	Vzorek č. 7 a
Běhový kondenzátor [μF]	50	41,8	36,6	37,5
Délka svazku [mm]	70	70	70	70
Počet závitů hlavního vinutí	40	38	38	40
Počet závitů pomocného vinutí	55	50	50	55
Průměr drátu hlavního vinutí [mm]	1x0,879	1x0,902	1x,0885	1x0,879
Průměr drátu pomocného vinutí [mm]	1x0,728	1x0,769	1x0,75	1x0,728
Odpor hlavního vinutí [Ω]	3,68	3,32	3,84	3,68
Odpor pomocného vinutí [Ω]	7,37	6,01	6,65	7,37
Šířka koncového kroužku [mm]	11	16	11	11
Hmotnost hl. vinutí [kg]	0,56	0,56	0,53	0,56
Hmotnost po. vinutí [kg]	0,52	0,53	0,50	0,52
Celková hmotnost [kg]	7,82	8,16	7,81	7,81
Typ plechů – výr. označení	M800 - 50 A	M800 - 50 A	M800 - 50 A	M400 - 50 A
Činitel plnění drážky hlavního vi. [%]	76	76	76	76
Činitel plnění drážky pomoc. Vi. [%]	74	74	74	74
Statorový proud [A]	7,58	6,59	6,43	6,61
Proud v hlavním vinutí [A]	1,95	4,86	4,82	4,62
Proud v pomocném vinutí [A]	7,47	5,33	4,51	4,88
Ztráty v mědi statoru [W]	425,7	248,57	206,82	253,96
Ztráty mědi v rotoru [W]	58,03	36,96	40,55	42,11
Ztráty na kondenzátoru [W]	35,56	21,59	17,71	20,22
Ztráty v železe [W]	58,77	56,09	53,09	51,53
Celkové ztráty [W]	600,2	384,62	339,24	388,98
Příkon [W]	1699	1484	1439	1488
Výkon [W]	1100	1100	1100	1100
Účinnost [%]	64,68	74,07	76,42	73,9
Mechanický moment na hřídeli [Nm]	7,1	7,19	7,24	7,23
Jmenovitý skluz [%]	1,4	2,7	3,3	3,2
$\cos\varphi$	0,98	0,98	0,97	0,98
Jmenovitá rychlost hřídele [min^{-1}]	1478	1459	1450	1452
Záběrný moment [Nm]	1,64	1,91	1,91	1,91
Maximální moment [Nm]	15,73	14,66	13,91	13,45

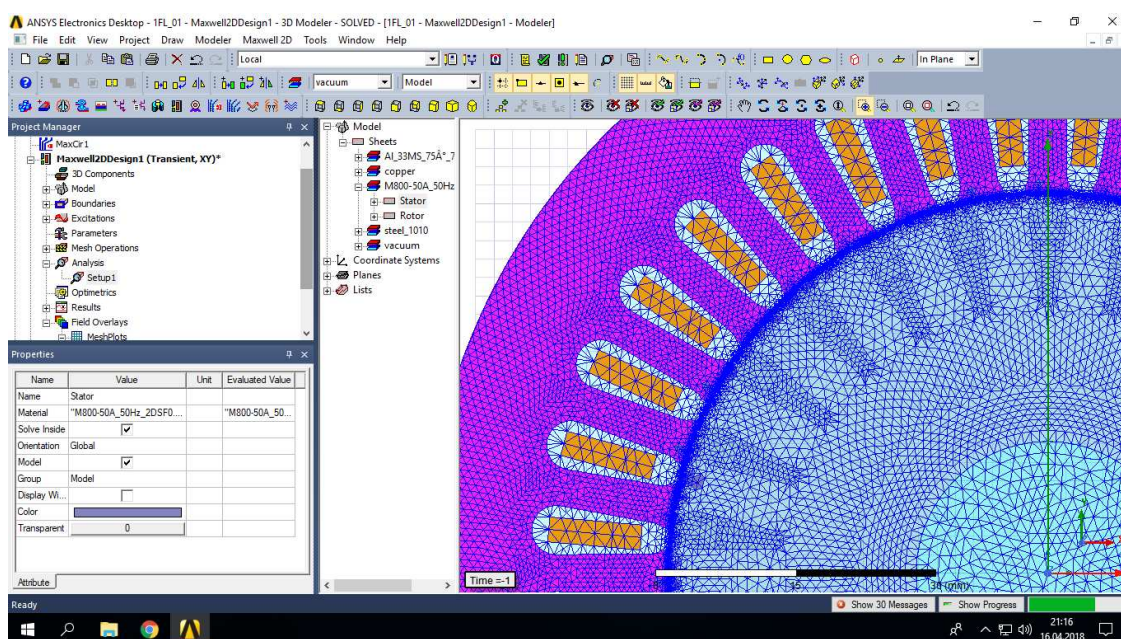
Tab. 15. Parametry vzorků č. 7 b – č. 9

Parametry	Vzorek č. 7 b	Vzorek č. 8 a	Vzorek č. 8 b	Vzorek č. 9
Běhový kondenzátor [μF]	37	33,5	32,8	38,5
Délka svazku [mm]	70	70	70	71,4
Počet závitů hlavního vinutí	40	40	40	38
Počet závitů pomocného vinutí	55	55	55	50
Průměr drátu hlavního vinutí [mm]	1x0,879	1x0,86	1x0,86	1x0,885
Průměr drátu pomocného vinutí [mm]	1x0,728	1x0,717	1x0,717	1x0,755
Odpor hlavního vinutí [Ω]	3,68	3,81	3,81	3,45
Odpor pomocného vinutí [Ω]	7,37	7,54	7,54	6,24
Šířka koncového kroužku [mm]	11	11	11	16
Hmotnost hl. vinutí [kg]	0,56	0,53	0,53	0,54
Hmotnost po. vinutí [kg]	0,52	0,51	0,5	0,51
Celková hmotnost [kg]	7,81	7,81	7,81	8,28
Typ plechů – výr. označení	M235 – 35 A	M400 – 50 A	M235 – 35 A	M800 – 50 A
Činitel plnění drážky hlavního vi. [%]	76	76	76	76
Činitel plnění drážky pomoc. Vi. [%]	74	74	74	74
Statorový proud [A]	6,73	6,3	6,43	6,31
Proud v hlavním vinutí [A]	5,07	4,07	4,66	4,02
Proud v pomocném vinutí [A]	4,75	4,29	4,12	4,89
Ztráty v mědi statoru [W]	260,57	201,84	210,62	204,74
Ztráty mědi v rotoru [W]	41,03	46,91	45,54	42,63
Ztráty na kondenzátoru [W]	19,4	17,48	16,44	19,73
Ztráty v železe [W]	50,7	46,91	46,39	53,05
Celkové ztráty [W]	392,8	334,07	339,83	341,37
Příkon [W]	1493	1434	1140	1442
Výkon [W]	1100	1100	1100	1100
Účinnost [%]	73,7	76,7	76,4	76,3
Mechanický moment na hřídeli [Nm]	7,24	7,26	7,28	7,23
Jmenovitý skluz [%]	3,3	3,6	3,7	3,1
$\cos\varphi$	0,97	0,99	0,97	0,99
Jmenovitá rychlost hřídele [min^{-1}]	1451	1446	1443	1454
Záběrný moment [Nm]	1,91	1,91	1,91	1,91
Maximální moment [Nm]	13,4	12,92	12,87	14,03

6 VZÁJEMNÉ SROVNANÉ VÝSLEDKY

6.1 ANSYS Maxwell

ANSYS Maxwell je vyspělý program pro simulace nízkofrekvenčních polí. Tento program využívá pro výpočet analýz, studie optimalizace elektromagnetických a elektromechanických zařízení (motory, transformátory, senzory, magenty atd.) metodu konečných prvků. Nabízí řešení elektromagnetického a elektrického pole stacionárně, ve frekvenční nebo nestacionární oblasti na 2D nebo 3D obecnou geometrii. Program tvoří nástroje pro parametrizaci nebo optimalizaci navrženého systému, kde vše je zakomponováno do prostředí ANSYS Electronics Desktop. Program nabízí snadnou orientaci v grafickém uživatelském prostředí a jeho snadné použití, kdy uživatel vytvoří nebo importuje geometrii zařízení, nastaví parametry simulace a pomocí zobrazení polí, grafů nebo animací vyhodnotí výsledky [9].



Obr. 33. Uživatelské rozhraní ANSYS Maxwell

Velkou výhodou programu je možnost importovat geometrii ve standardních CAD formátech nebo jiných programů ANSYS (RMxpert, PExpert). Obsahuje generátor výpočetní sítě, který s výhodou využívá autoadaptivní proces tvorby sítě. Program automaticky generuje kvalitní výpočetní síť na libovolné geometrii s lokálním zjemněním. V nabídce programu je rozsáhlá databáze materiálů, kterou je možné editovat nebo si vytvořit vlastní databázi podle potřeb uživatele. Do simulací se může zahrnout nelinearity materiálů např. BH křivka,

hysterezní smyčka, skin efekt, demagnetizace magnetů, teplotní závislosti materiálových vlastností atd. Při importu z prostředí RMXprt do Maxwellu (případ této práce) program automaticky vytvoří externí napájecí obvod v modulu Circuit Editor. Při tvorbě obvodů se využívá definovaná knihovna komponentů [9].

6.1.1 Metoda konečných prvků

Tato metoda je v současné době nejrozšířenější metodou v technických oborech. Patří k numerickým metodám a její výpočet se dobře algoritmizuje (přesný návod či postup). MKP se nejvíce rozšířila ve druhé polovině 20. století s rozvojem výpočetní techniky. Využívá metodu řešící parciální diferenciální rovnice. Princip metody spočívá v rozebrání úlohy na malé části (končené prvky), ve kterých se hledá přibližné řešení. Při hledání přibližného řešení se využívají funkce, které určují kvalitu výsledného řešení konečného prvku [10].

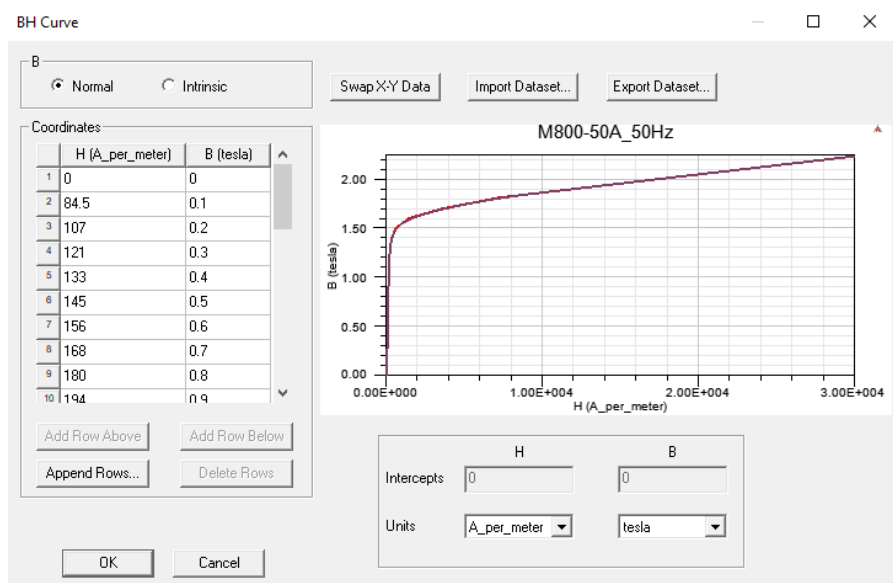
Algoritmus výpočtu MKP:

1. Uživatel (Operační systém, Inženýr)
2. Preprocesor (Zadaní vstupních dat a parametrů pro výpočet)
3. Procesor (Analýza prvku → Analýza konstrukce → Dokončení analýzy)
4. Postprocesor (Zpracování a vyhodnocení výsledků z výpočtu)
5. Uživatel (Hardware, Operační systém)

6.1.2 Vytvoření 2D modelu

K vytvoření modelu pro simulaci motorů a jiných vzorků byly použity programy balíčku ANSYS Electronics Desktop. Program RMXprt je program, který simuluje motor pomocí analytického výpočtu podle známých vzorců. Po spuštění programu se vybere nejprve typ stroje a do předdefinovaných tabulek se vyplní žádané parametry motoru. Prostředí RMXprt je vidět na Obr. 18. Program nabízí databázi předem definovaných materiálů, které mohou být použity např. různé druhy plechů, ocelí, materiálu vodičů atd. Neuvedené materiály v knihovně se mohou nadefinovat podle potřeb (viz. Obr. 34).

Po provedení analytického výpočtu jde model exportovat do 2D nebo 3D zobrazení pro analýzu metodou konečných prvků do programu ANSYS Maxwell. Poté se musí vytvořit síť pro analytické řešení výpočtu. Jemnost sítě se nastavuje v předvolbě programu a je nastavena podle potřeby. Po požadovaných nastaveních se spustí výpočet, který trvá podle nastavení časového kroku a času zastavení. Čím menší časový krok, tím delší výpočet. Po konci výpočtu program vygeneruje různé grafy veličin (nastavené podle potřeby, které se vyžadují) závislé na čase. Z těchto závislostí se určí potřebné informace a hodnoty.



Obr. 34. BH-křivka plechů M800-50 A v prostředí RMXprt

6.2 Srovnání simulací zadaného motoru

Simulace byla provedena tak, že napevno byly zadány otáčky rotoru, které se během simulace nezměnily. Tento způsob výrazně zkrátil dobu simulace. V modelu byla vytvořena síť pro analytické řešení výpočtu, kde byla pomocí funkce mesh nastavena jemnost sítě pro přesnější řešení simulace. Simulace byla nastavena do konečného času 200 ms po kroku 100 μ s.

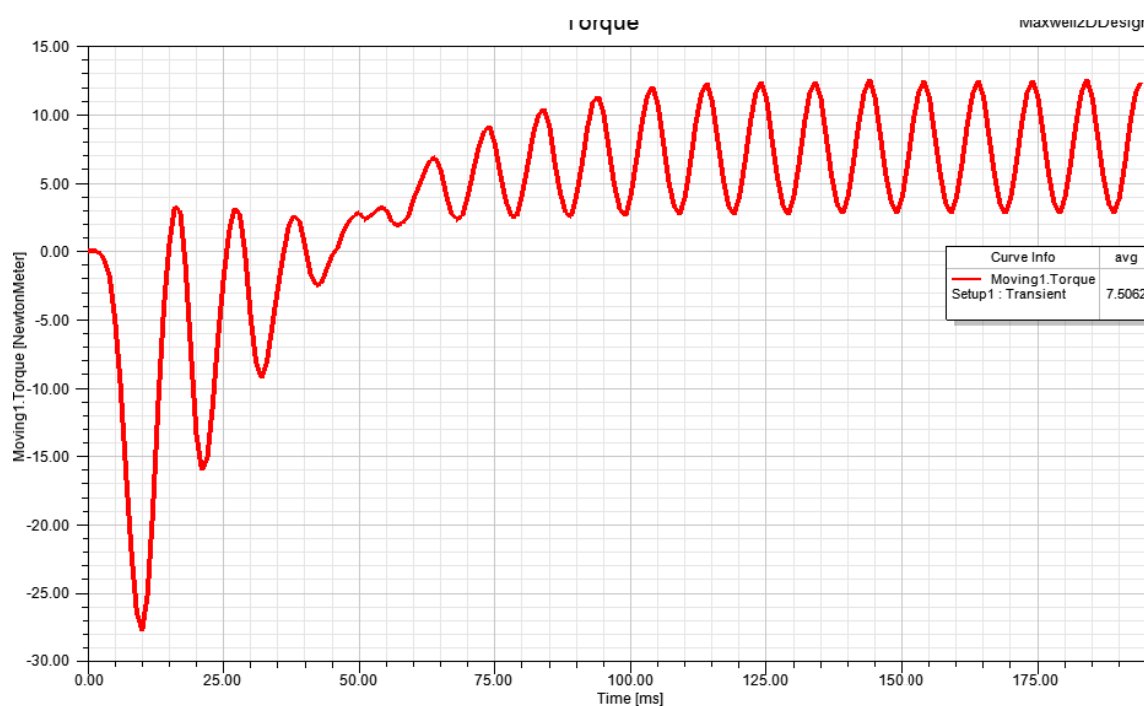
Tab. 16. Srovnání výsledků simulací zadaného motoru

	RMxprt	Maxwell	ΔX [%]
Moment [Nm]	7,21	7,51	4
Statorový proud [A]	6,93	6,42	-7,36
Proud (Hl. fáze) [A]	4,89	4,53	-7,36
Proud (Po. fáze) [A]	4,23	3,91	-7,57
Napětí [V]	230	212,5	-7,61
Ztráty vířivými proudy [W]	-	12,8	-
Přídavné ztráty [W]	-	18,6	-
Hysterezní ztráty [W]	-	20,8	-
Ztráty v železe [W]	57,72	52,2	-9,56
Ztráty ve vinutí statoru [W]	276,09	249,52	-9,62
Účinnost [%]	72,6	72,3	-0,3

V ANSYS Maxwell se nastavily závislosti veličin, ze kterých po skončení simulace byly určeny velikosti parametrů, které byly srovnány s parametry z RMXprt – viz. Tab. 16. Byly určeny střední hodnoty momentu a všech ztrát.

Napětí a proudy byly odečteny jako efektivní hodnoty. Na obr. 35 je znázorněn časový průběh momentu.

Na porovnání byly určeny ztráty ve vinutí statoru a ztráty v železe, které se skládají ze ztrát hysterezních, přídavných a vířivými proudy. Součtem těchto ztrát se dostanou ztráty v železe, které s porovnáním s velikostí z RMxpřt jsou menší o 5,5 W, tj. o 9,56 %. Ztráty ve vinutí statoru (Joulovy ztráty) jsou menší (oproti RMxpřt) o 27,05 W, tj. o 9,62 %. Dále byly porovnány proudy v pomocné a hlavní fázi a napětí, kde se výchyly pohybují zhruba okolo 8 %. Nejmenší výchyly nastala u momentu, kde moment vzrostl s porovnáním se vzorkem z RMxpřtem o 0,3 Nm, tj. o 4 %.



Obr. 35. Časový průběh momentu zadaného motoru v ANSYS Maxwell

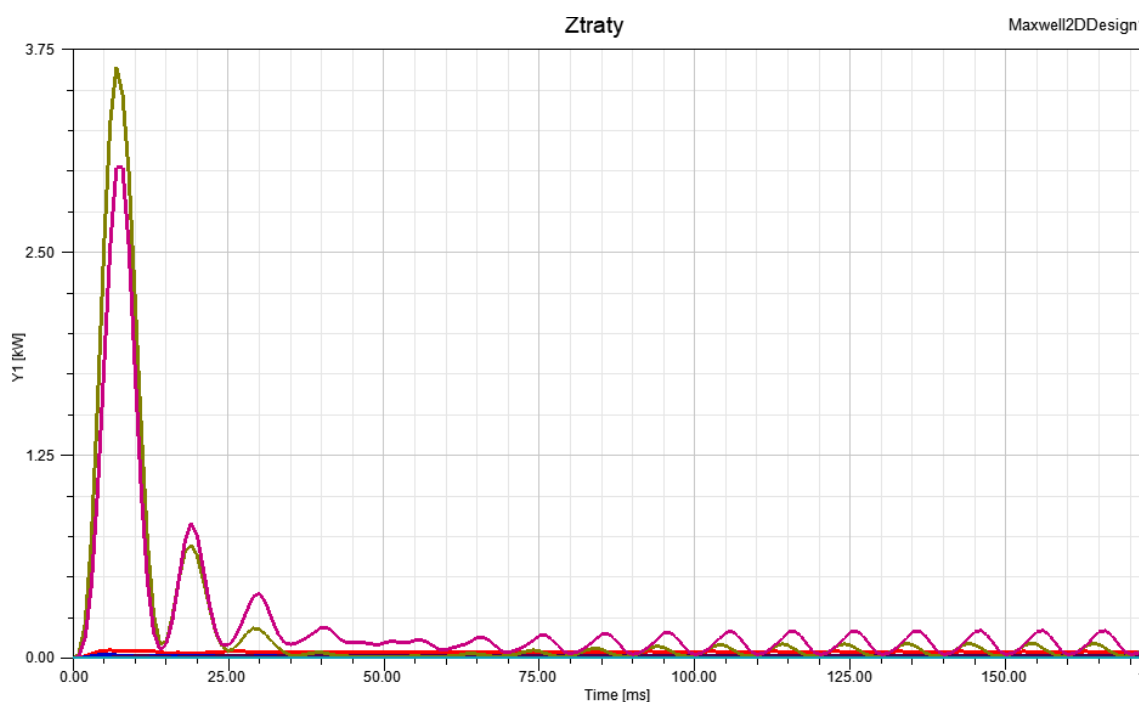
6.3 Srovnání simulací vzorku s nejvyšší účinností

V této podkapitole jsou srovnány simulace vzorku s nejlepší účinností. Nejlepší účinnost měl vzorek č. 8 s úpravami, které jsou popsány v kap. 5.8. Účinnost tohoto vzorku byla $\eta=76,7$ %. V Maxwellu byly nasimulovány stejné časové závislosti parametrů jako v předešlé kapitole a srovnány s hodnotami určené simulací pomocí RMxpřt. Všechny údaje pro srovnání jsou v Tab. 17.

Největší odchylka simulace byla u ztrát v železe (viz. Obr. 35), kde se ztráty snížily o 3,6 W, tj. o 7,68 %. Naopak nejmenší výchyly byla u momentu, kde se velikost zvětšila o 0,27 Nm, tj. o 3,6 %. Zbylé veličiny měly výchyly zhruba stejné a pohybovaly se okolo 6 %.

Tab. 17. Srovnání výsledků simulací vzorku s nejvyšší účinností

	RMxpřt	Maxwell	ΔX [%]
Moment [Nm]	7,26	7,53	3,59
Statorový proud [A]	6,3	6,75	6,67
Proud (Hl. fáze) [A]	4,07	3,82	-6,14
Proud (Po. fáze) [A]	4,3	4,1	-4,65
Napětí [V]	230	212,8	-7,48
Ztráty vířivými proudy [W]	-	9,5	-
Přídavné ztráty [W]	-	15,2	-
Hysterezní ztráty [W]	-	18,6	-
Ztráty v železe [W]	46,9	43,3	-7,68
Ztráty ve vinutí statoru [W]	201,84	189,35	-6,18
Účinnost [%]	76,7	76,1	-0,6



Obr. 36. Časový průběh ztrát vzorku s nejvyšší účinností

ZÁVĚR

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo zvýšení účinnosti zadaného jednofázového asynchronního motoru a provést analýzu jednotlivých druhů ztrát. Práce byla řešena prostřednictvím simulací, analytického výpočtu a metodou konečných prvků. Byly navrženy určité úpravy konstrukce motoru, které mohli vést ke zlepšení účinnosti motoru a pomocí simulace studován jejich vliv na chování motoru.

Teoretická část je zaměřena na teorii točivých strojů. V první kapitole je uvedena definice a obecné dělení asynchronních motorů. Dále je zde uveden princip a poznatky o funkčnosti celého mechanismu asynchronních motorů. V druhé a třetí kapitole jsou uvedeny základní informace o třífázových a jednofázových motorech a jejich rozdělení podle vinutí, klece apod.

V praktické části se bakalářská práce zabývá návrhem jednofázového asynchronního motoru, zvýšení účinnosti zadaného modelu motoru a srovnání výsledků simulací. Ve čtvrté kapitole je podrobně uveden analytický výpočet parametrů, které jsou definovány základními vztahy potřebné k výpočtu důležitých parametrů pro návrh celého motoru. V této části je navržen nový model motoru a informace potřebné pro výpočet jsou převzaty ze štítkových hodnot zadaného motoru doplněny několika parametry, které byly potřeba pro návrh motoru. Celý návrh je zdoluhavý a časově náročný. Většina vztahů byla převzata z lit. [3]. V této literatuře je motor navrhován s rozběhovým kondenzátorem, který se po rozběhu motoru odpojí, ale motor v této práci je navržen s trvale připojeným kondenzátorem, a proto z této literatury nejsou čerpány úplně všechny informace a jsou doplněny z jiné literatury. Podle vypočtených hodnot byl vytvořen model navrženého motoru v programu ANSYS RMxprt pro simulaci motoru. Tento program využívá analytického výpočtu pro simulaci podle známých vzorců a simulace v programu trvá několik minut. Podle simulace bylo zjištěno, že navržený motor je příliš velký pro požadovaný malý výkon $P=1,1$ kW a jeho účinnost pro tento výkon je velmi malá ($\eta=41$ %). Navržený motor je navržen pro větší výkony, kde by dosáhl lepší účinnosti (viz obr. 19). Tento problém byl vyřešen tak, že motor byl konstrukčně upraven, aby mohl dosáhnout maximální účinnosti při výkonu $P=1,1$ kW. Navržený upravený motor dosáhl maximální účinnosti $\eta=70$ % při požadovaném výkonu a byl srovnán s modelem zadaného motoru pomocí simulací v programu RMxprt. Zadaný model motoru má účinnost $\eta=73$ %, což je o 3 % lepší než navržený upravený model motoru.

Další kapitola je zaměřena na zvýšení účinnosti zadaného motoru a zkoumání jednotlivých navržených úprav a jejich vliv na účinnost motoru. Byly zkoumány tyto úpravy: prodloužení magnetického obvodu, změna velikosti

průměru drátů a počtu závitů, optimalizace tvaru drážek, změna druhu materiálu kruhů a tyčí, změna druhu materiálu plechů a změna šířky koncového kroužku rotoru. Bylo vytvořeno několik vzorků s těmito úpravami a zkoumán jejich vliv na jednotlivé druhy ztrát. Veškeré simulace byly prováděny v programu ANSYS RMxprt a porovnávány se zadaným modelem motoru. Při změně konstrukce motoru se vždy změnilo několik parametrů. Podmínkou pro porovnávání motorů bylo, aby vždy vzorek měl shodný záběrný moment se zadaným motorem, tj. $M_z=1,91$ Nm. Tato hodnota se většinou změnila a musela být dorovnáována pomocí velikosti kondenzátoru. Při zvětšení velikosti kondenzátoru vzrostla i velikost záběrného momentu, ale klesala účinnost a naopak. Při změně průměru vodičů, závitů a tvaru drážek se vždy musela dodržet hranice činitele plnění drážky. Při těchto změnách byla vždy hodnota činitele plnění drážky dorovnána. Hlavní vinutí měl činitel plnění 76 % a pomocné (rozběhové) vinutí 74 %. Nejvyšší účinnost byla dosažena u vzorku č. 8 a to $\eta=76,7$ %, což je o 4,1 % vyšší oproti účinnosti zadaného motoru. Tento vzorek má plechy M400-50 A (oproti původním M800- 50 A), optimalizovaný tvar drážek (viz obr. 26 a obr. 27), průměr hlavního vinutí 1x0,86 mm, počet závitů hlavního vinutí zvýšený na 40, průměr pomocného vinutí 1x0,717 mm a počet závitu snížen na 55. Naopak nejnižší účinnost byla u vzorku č. 4, kde účinnost klesla o necelých 8 % s porovnáním se zadaným modelem motoru na $\eta=64,7$ %. U tohoto vzorku byla hliníková klec a tyče, kde tyto části byly změněny na měď. Při této změně se změnil záběrný moment na $M_z=1,05$ Nm a zvyšováním velikosti kapacity se nedocílilo požadovaného záběrného momentu, protože při větších velikostech kapacity (nad 50 μ F) nemohl být motor spuštěn (nasimulován), a proto se účinnost zastavila na této hodnotě. Tato změna je efektivní u třífázových motorů, nikoliv u jednofázového, protože tuto změnu ovlivňuje trvale připojený kondenzátor. Změna by mohla být možná účinná, kdyby se ke vzorku připojil ještě jeden kondenzátor určený pro rozběh.

V poslední kapitole byly srovnány simulace v programech RMxprt a Maxwellu pro zjištění přesnosti simulací. Program ANSYS Maxwell používá pro výpočet metodu konečných prvků. Tato metoda je velmi složitá a časově náročná. Simulace v tomto programu je zdlouhavá a délka simulace se pohybuje řádově v hodinách. Byl simulován model zadaného motoru a model vzorku motoru s nejvyšší účinností ($\eta=76,7$ %). Byly srovnávány tyto parametry: ztráty ve vinutí statoru, v železe, statorový proud, proud v hlavním a pomocném vinutí a moment. Všechny parametry jsou srovnány s parametry z ANSYSU RMxpřtu v Tab. 16 a Tab. 17. Největší odchylky u obou simulací byly u ztrát ve vinutí statoru, a naopak nejmenší odchylky byly u momentů modelů.

Literatura

- [1] MRAVEC, Rudolf. *Elektrické stroje a přístroje*. Bratislava: Alfa, 1976. Edícia elektrotechnickej literatúry (Alfa)
- [2] HOMOLA, Ladislav. *Elektrické stroje na striedavý proud: příručka pro techniky a studující průmyslových škol*. 4. dopl. vyd. V Praze: I.L. Kober, 1947.
- [3] CIGÁNEK, Ladislav. *Stavba elektrických strojů: Celost. vysokošk. učebnice*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1958. Řada elektrotechnické literatury.
- [4] ONDRŮŠEK, Čestmír. *Skripta: elektrické stroje*, 18.5.2017 [cit. 2017-11-25].
- [5] ŠTĚPINA, Jaroslav. *Jednofázové indukční motory: celostátní vysokoškolská příručka: určeno výpočtářům a konstruktérům v elektrotechnickém průmyslu*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1957. Řada elektrotechnické literatury.
- [6] PETROV, Georgij Nikolajevič. *Elektrické stroje 2*. Praha: Academia, 1982.
- [7] BRÁZDA, Miroslav a Rudolf STAŇA. *Výpočet asynchronního motoru*. Brno: Výzkumný a vývojový ústav elektrických strojů točivých, 1973.
- [8] ANSYS RMXprt | TechSoft Engineering, spol. s r.o. [online]. Praha: Techsoft Engineering, spol. s r.o., ©2012-2014 [cit. 2017-12-21]. Dostupné z: <http://www.techsoft-eng.cz/ansys-2/elektromagnetismus/ansys-maxwell-2/ansys-rmxprt/>.
- [9] ANSYS RMXprt | TechSoft Engineering, spol. s r.o. [online]. Praha: Techsoft Engineering, spol. s r.o., ©2012-2014 [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: <https://www.techsoft-eng.cz/ansys-2/elektromagnetismus/ansys-maxwell-2/>.
- [10] KATEDRA STAVEBNÍ MECHANIKY. *Počítačová podpora statických výpočtů: Metoda konečných prvků*. [online prezentace]. Ostrava: Fakulta stavební, VŠB, [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: <http://fast10.vsb.cz/ppsv/03.pdf>.

Seznam symbolů, veličin a zkratek

A	-	Proudová vrstva	[A/m]
B	-	Magnetická indukce	[T]
b	-	Šířka zubu	[mm]
C	-	Konstanta stroje	[-]
C	-	Kapacita	[F]
C	-	Konstanta závislá na počtu pólů	[-]
$\cos\varphi$	-	Účinník	[-]
D	-	Vrtání statoru	[mm]
D	-	Průměr	[mm]
F	-	Magnetomotorické napětí	[N]
f	-	Frekvence	[Hz]
G	-	Váha	[kg]
h	-	Výška zubu	[mm]
I	-	Proud	[A]
k	-	Činitel vinutí	[-]
k_c	-	Carterův činitel	[-]
L	-	Efektivní délka železa	[mm]
l	-	Délka čela	[mm]
M	-	Moment	[Nm]
m	-	Počet fází klece	[-]
N	-	Počet závitů	[-]
N	-	Počet závitů v sérii	[-]
n	-	Otáčky	[min ⁻¹]
P	-	Výkon	[W]
p	-	Počet pólových dvojic	[-]
Q	-	Počet drážek	[-]
q	-	Tabulkový počet drážek	[-]
R	-	Odpor	[Ω]
s	-	Skluz	[-]
S	-	Průřez	[mm ²]
t	-	Drážková rozteč	[mm]
U	-	Napětí	[V]
X	-	Reaktance	[Ω]
X_d	-	Drážková reaktance	[Ω]
Z	-	Impedance	[Ω]
ΔP	-	Ztráty	[W]
η	-	Účinnost	[-]

τ_p		Pólová rozteč	[-]
π	-	Ludolfovo číslo	[-]
n_d	-	Počet vodičů	[-]
Φ	-	Magnetický tok	[Wb]
α	-	Činitel plnění pólové křivky	[-]
δ	-	Vzduchová mezera	[mm]
γ	-	Konstanta	[-]
λ_d	-	Jednotková rozptylová vodivost	[-]
χ	-	Permeabilita vakua	[H/m]
μ_0	-	Přepočítací činitel	[-]
τ_{dif}	-	Činitel diferenčního rozptylu	[Ω]

Seznam příloh

Příloha 1. Parametry motoru 1FL_01(1) (Navržený motor A)

Příloha 2. Parametry motoru 1FL_01(1) (Navržený upravený motor B)

Příloha 3. Parametry motoru 1FL_01 (Zadaný motor C)

Další přílohy jsou na přiloženém CD.

Příloha 1 Parametry motoru 1FL_01(1) (Navržený motor A)

GENERAL DATA

Rated Output Power (kW):	1.1
Rated Voltage (V):	230
Number of Poles:	4
Frequency (Hz):	50
Rated Speed (rpm):	1420
Frictional Loss (W):	5
Windage Loss (W):	15
Type of Load:	Constant Power
Iron Core Length (mm):	104.21
Stacking Factor of Iron Core:	0.95
Type of Steel:	M800-50 A
Operating Temperature (C):	75
Rotor Position:	Inner
Operation mode:	Capacitor-Run Mode
Run Capacitance (uF):	30
& Its Resistance (ohm):	1.06103
Speed-Adjustment mode:	No Speed-Adjustment

STATOR DATA

Number of Stator Slots:	36
Outer Diameter of Stator (mm):	136.15
Inner Diameter of Stator (mm):	88.452
Type of Stator Slot:	1
Stator Slot	
hs0 (mm):	0.8
hs2 (mm):	10.2
bs0 (mm):	2.5
bs1 (mm):	3.424
bs2 (mm):	5.34
Top Tooth Width (mm):	4.63841
Bottom Tooth Width (mm):	4.50768
Main Aux.	
Type of Coils:	11 11
Conductor Length Adjustment (mm):	0 0
Number of Parallel Branches:	1 1
Number of Wires per Conductor:	1 1
Number of Conductors per Slot	32 66
Main-Phase Wire Diameter (mm):	1.296
Aux.-Phase Wire Diameter (mm):	0.757
Main-Phase Wire Wrap (mm):	0.068
Aux.-Phase Wire Wrap (mm):	0.041
Designed Wedge Thickness (mm):	0.912521
Slot Insulation Thickness (mm):	0.3
Layer Insulation Thickness (mm):	0
Limited Slot Fill Factor (%):	75
Wire Resistivity (ohm.mm ² /m):	0.0217

Aux Wire Resistivity (ohm.mm ² /m):	0.0217
ROTOR DATA	
Number of Rotor Slots:	26
Air Gap (mm):	0.25
Inner Diameter of Rotor (mm):	42.912
Type of Rotor Slot:	1
Rotor Slot	
hs0 (mm):	0.475
hs2 (mm):	8.71
bs0 (mm):	0.8
bs1 (mm):	4.1
bs2 (mm):	2
Cast Rotor:	Yes
Number of Vents:	0
Vent Diameter (mm):	0
Vent Location (mm):	0
Skew Width:	1.01
End Length of Bar (mm):	0
Height of End Ring (mm):	19.25
Width of End Ring (mm):	11
Bar Resistivity (ohm.mm ² /m):	0.030303
End_Ring Resistivity (ohm.mm ² /m):	0.030303
Rotor Core Length (mm):	104.21
Rotor Stacking Factor	0.95
Rotor Steel Type	M800-50 A
Magnetic Shaft:	Yes
MATERIAL CONSUMPTION	
Armature Wire Density (kg/m ³):	8900
Auxiliary Wire Density (kg/m ³):	8900
Rotor Bar Density (kg/m ³):	8900
Rotor Ring Density (kg/m ³):	8900
Armature Core Steel Density (kg/m ³):	7800
Rotor Core Steel Density (kg/m ³):	7800
Main Winding Copper Weight (kg):	1.22671
Auxiliary Winding Copper Weight (kg):	0.863212
Adjust Winding Copper Weight (kg):	0
Rotor Bar Material Weight (kg):	0.846324
Rotor Ring Material Weight (kg):	0.802261
Armature Core Steel Weight (kg):	4.78592
Rotor Core Steel Weight (kg):	2.87003
Total Net Weight (kg):	11.3945
Armature Core Steel Consumption (kg):	10.2069
Rotor Core Steel Consumption (kg):	4.74496
RATED OPERATION	
Main-Phase Resistance (ohm):	1.71875
Main-Phase Resistance at 20C (ohm):	1.41381
Aux.-Phase Resistance (ohm):	10.3902

Aux.-Phase Resistance at 20C (ohm):	8.54678
Main Leakage Reactance (ohm):	5.12095
Aux. Leakage Reactance (ohm):	21.784
Rotor Resistance (ohm):	2.14224
Rotor Leakage Reactance (ohm):	3.92637
Magnetizing Reactance (ohm):	59.1479
Turn Ratio of Aux. to Main-Coil:	2.0625
Stator Line Current (A):	13.1863
Main-Phase Current (A):	7.08036
Aux.-Phase Current (A):	8.37257
Phase Shift between Main and Aux. Currents (degrees):	-65.9381
Capacitor Voltage (V):	888.357
Capacitor Loss (W):	74.3784
Copper Loss of Stator Winding (W):	814.516
Copper Loss of Rotor Winding (W):	555.879
Iron-Core Loss (W):	99.1206
Frictional and Windage Loss (W):	22.0168
Total Loss (W):	1565.91
Input Power (W):	2664.86
Output Power (W):	1098.95
Mechanical Shaft Torque (N.m):	7.11323
Efficiency (%):	41.2386
Power Factor:	0.87867
Rated Slip:	0.0164583
Rated Shaft Speed (rpm):	1475.31
NO-LOAD OPERATION	
Main Leakage Reactance (ohm):	4.92535
Aux. Leakage Reactance (ohm):	20.952
Rotor Leakage Reactance (ohm):	3.78199
Magnetizing Reactance (ohm):	55.591
No-Load Stator Line Current (A):	10.9844
No-Load Main-Phase Current (A):	7.07863
No-Load Aux.-Phase Current (A):	8.94255
Phase Shift between No-Load Main and Aux. Currents (degrees):	-97.3562
No-Load Iron-Core Loss (W):	105.192
No-Load Input Power (W):	1739.77
No-Load Power Factor:	0.688631
No-Load Slip:	0.00353597
No-Load Shaft Speed (rpm):	1494.7
BREAK-DOWN OPERATION	
Break-Down Slip:	0.09
Break-Down Torque (N.m):	19.1017
Break-Down Torque Ratio:	2.68538
LOCKED-ROTOR OPERATION	
Locked-Rotor Torque (N.m):	2.32735

Locked-Rotor Line Current (A):	22.7667
Locked-Rotor Torque Ratio:	0.327185
Locked-Rotor Current Ratio:	1.72654
Locked-Rotor Main-Phase Current (A):	25.0668
Locked-Rotor Aux.-Phase Current (A):	3.14972
Phase Shift between Locked-Rotor Main and Aux. Currents (degrees):	141.867
DETAILED DATA AT RATED OPERATION	
Main Slot Leakage Reactance (ohm):	1.38559
Main End-Winding Leakage Reactance (ohm):	0.482712
Main Differential Leakage Reactance (ohm):	3.25264
Aux. Slot Leakage Reactance (ohm):	5.89418
Aux. End-Winding Leakage Reactance (ohm):	2.05341
Aux. Differential Leakage Reactance (ohm):	13.8364
Rotor Slot Leakage Reactance (ohm):	1.43267
Rotor End-Winding Leakage Reactance (ohm):	0.0626797
Rotor Differential Leakage Reactance (ohm):	1.1884
Skewing Leakage Reactance (ohm):	1.24262
Main-Phase Winding Factor:	0.898056
Aux.-Phase Winding Factor:	0.898056
Angle Between Main & Aux. Winding Axes (degrees):	89.1229
Mutual Leakage Reactance (ohm):	-4.17863
Stator-Teeth Flux Density (Tesla):	1.63605
Rotor-Teeth Flux Density (Tesla):	1.74854
Stator-Yoke Flux Density (Tesla):	2.35707
Rotor-Yoke Flux Density (Tesla):	0.726578
Air-Gap Flux Density (Tesla):	0.916352
Stator-Teeth Ampere Turns (A.T):	27.1915
Rotor-Teeth Ampere Turns (A.T):	58.6971
Stator-Yoke Ampere Turns (A.T):	135.008
Rotor-Yoke Ampere Turns (A.T):	1.51121
Air-Gap Ampere Turns (A.T):	261.051
Correction Factor for Magnetic Circuit Length of Stator Yoke:	0.1
Correction Factor for Magnetic Circuit Length of Rotor Yoke:	0.7
Saturation Factor for Teeth:	1.32901
Saturation Factor for Teeth & Yoke:	1.85197
Induced-Voltage Factor:	1.12581
Mean Half-Turn Length of	

Main-Phase Winding (mm):	181.397
Mean Half-Turn Length of	
Aux.-Phase Winding (mm):	181.397
Harmonic Winding Factors:	
Harmonic Orders Main Aux.	
H1:	0.8981 0.8981
H3:	0.2940 0.2940
H5:	0.1724 0.1724
H7:	0.1250 0.1250
H9:	0.1111 0.1111
Main-Phase Slot Fill Factor (%):	129.644
Aux.-Phase Slot Fill Factor (%):	91.5214
Main Winding Current Density (A/mm ²):	5.36729
Aux. Winding Current Density (A/mm ²):	18.6028
Specific Electric Loading (A/mm):	50.471
Stator Thermal Load (A ² /mm ³):	744.651

WINDING ARRANGEMENT

The 2-phase, 1-layer winding can be arranged in 36 slots as below:

AAAAABBBBXXXXXXYYYYAAAAABBBBXXXXXXYYYY

Average coil pitch is:	6.77778
Angle per slot (elec. degrees):	20
Phase-A axis (elec. degrees):	125.439
First slot center (elec. degrees):	0

TRANSIENT FEA INPUT DATA

For Main Winding:

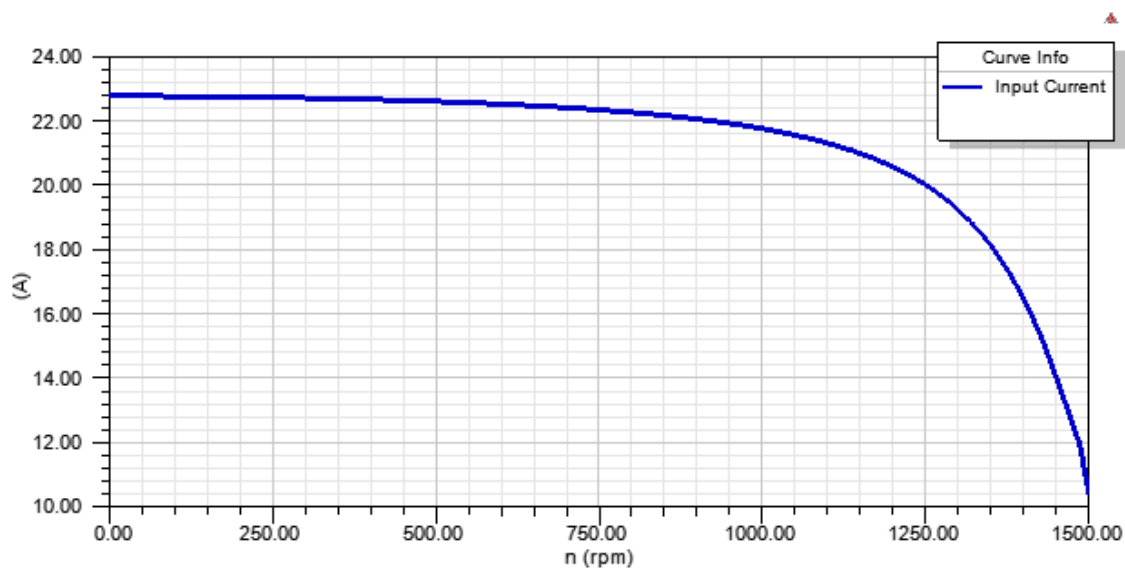
Number of Turns:	288
Parallel Branches:	1
Terminal Resistance (ohm):	1.71875
End Leakage Inductance (H):	0.00153652

For Aux. Winding:

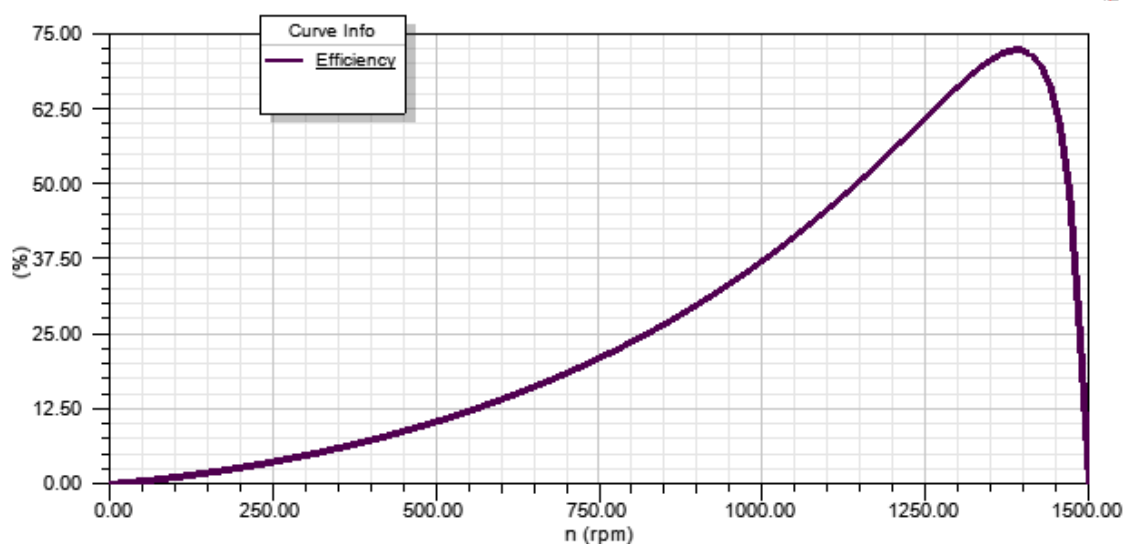
Number of Turns:	594
Parallel Branches:	1
Terminal Resistance (ohm):	10.3902
End Leakage Inductance (H):	0.00653622
Starting Capacitance (uF):	0
Running Capacitance (uF):	30
Switch Speed (rpm):	0

For Rotor End Ring Between Two Bars of One Side:

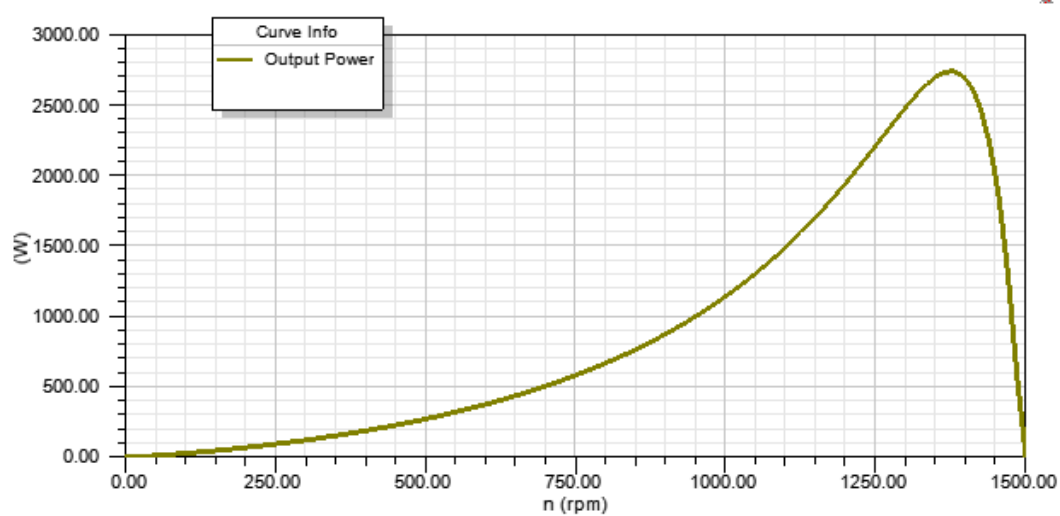
Equivalent Ring Resistance (ohm):	1.27102e-006
Equivalent Ring Inductance (H):	2.17242e-008
2D Equivalent Value:	
Equivalent Model Depth (mm):	104.21
Equivalent Stator Stacking Factor:	0.95
Equivalent Rotor Stacking Factor:	0.95
Estimated Rotor Moment of Inertia (kg m ²):	0.00477515



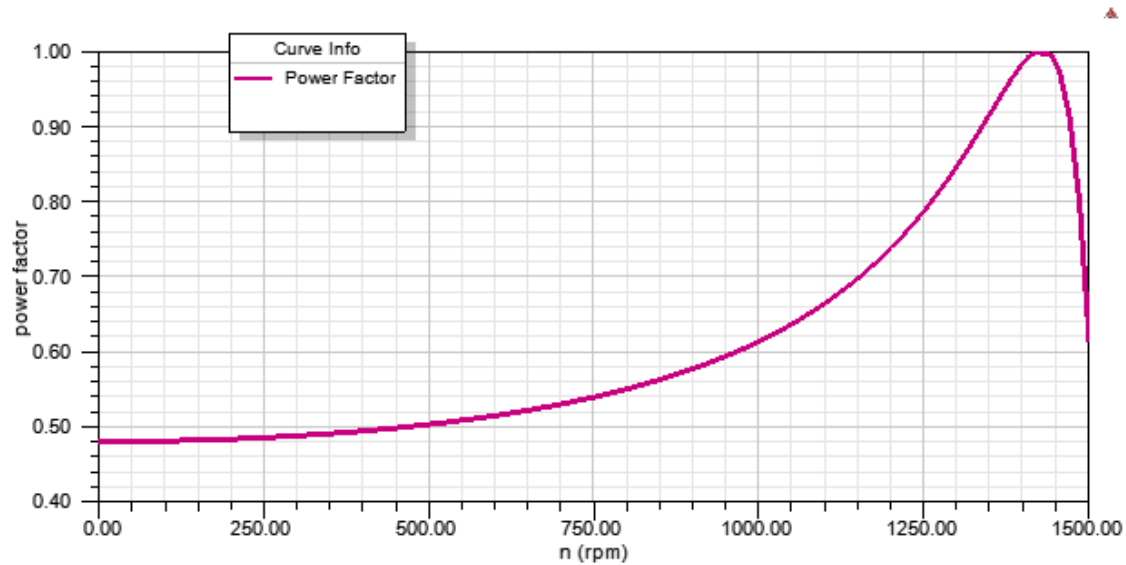
Obr. 37. Závislost proudu na otáčkách motoru A



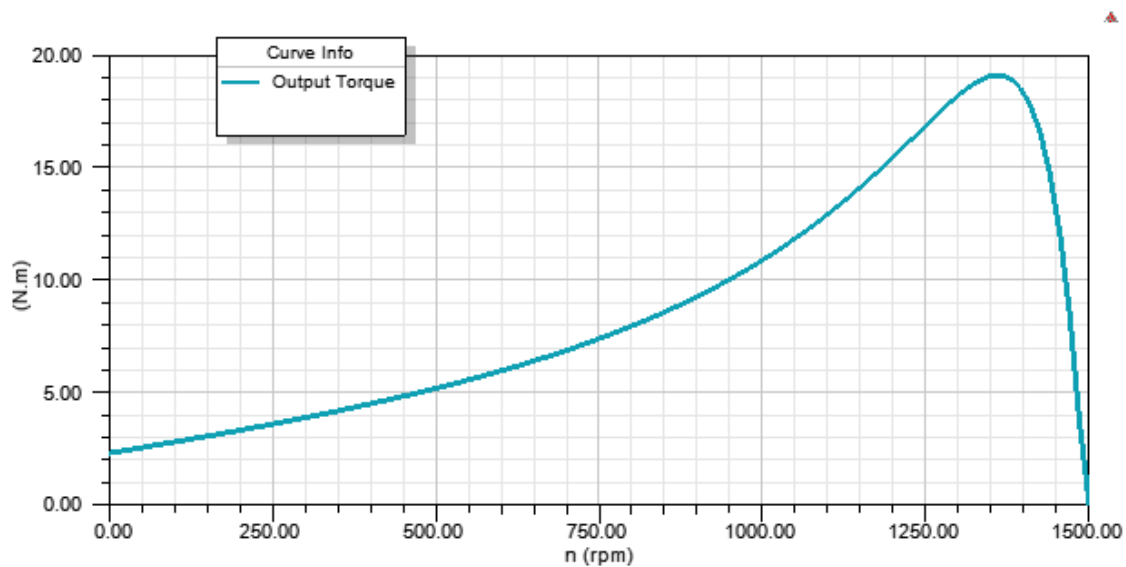
Obr. 38. Závislost účinnosti na otáčkách motoru A



Obr. 39. Závislost výkonu na otáčkách motoru A



Obr. 40. Závislost účinníku na otáčkách motoru A



Obr. 41. Momentová charakteristika motoru A

Příloha 2 Parametry motoru 1FL_01(1) (Navržený upravený motor B)

GENERAL DATA

Rated Output Power (kW):	1.1
Rated Voltage (V):	230
Number of Poles:	4
Frequency (Hz):	50
Rated Speed (rpm):	1420
Frictional Loss (W):	5
Windage Loss (W):	15
Type of Load:	Constant Power
Iron Core Length (mm):	70
Stacking Factor of Iron Core:	0.95
Type of Steel:	M800-50
Operating Temperature (C):	75
Rotor Position:	Inner
Operation mode:	Capacitor-Run Mode
Run Capacitance (uF):	35.4
& Its Resistance (ohm):	0.89918
Speed-Adjustment mode:	No Speed-Adjustment

STATOR DATA

Number of Stator Slots:	36
Outer Diameter of Stator (mm):	136.15
Inner Diameter of Stator (mm):	88.452
Type of Stator Slot:	1
Stator Slot	
hs0 (mm):	0.8
hs2 (mm):	10.2
bs0 (mm):	2.5
bs1 (mm):	3.424
bs2 (mm):	5.34
Top Tooth Width (mm):	4.63841
Bottom Tooth Width (mm):	4.50768
Main Aux.	
Type of Coils:	11 11
Conductor Length Adjustment (mm):	0 0
Number of Parallel Branches:	1 1
Number of Wires per Conductor:	1 1
Number of Conductors per Slot	32 50
Main-Phase Wire Diameter (mm):	0.985
Aux.-Phase Wire Diameter (mm):	0.773
Main-Phase Wire Wrap (mm):	0.059
Aux.-Phase Wire Wrap (mm):	0.052
Designed Wedge Thickness (mm):	0.912521
Slot Insulation Thickness (mm):	0.3
Layer Insulation Thickness (mm):	0
Limited Slot Fill Factor (%):	75
Wire Resistivity (ohm.mm ² /m):	0.0217

Aux Wire Resistivity (ohm.mm ² /m):	0.0217
ROTOR DATA	
Number of Rotor Slots:	26
Air Gap (mm):	0.25
Inner Diameter of Rotor (mm):	42.912
Type of Rotor Slot:	1
Rotor Slot	
hs0 (mm):	0.475
hs2 (mm):	8.71
bs0 (mm):	0.8
bs1 (mm):	4.1
bs2 (mm):	2
Cast Rotor:	Yes
Number of Vents:	0
Vent Diameter (mm):	0
Vent Location (mm):	0
Skew Width:	1.01
End Length of Bar (mm):	0
Height of End Ring (mm):	19.25
Width of End Ring (mm):	11
Bar Resistivity (ohm.mm ² /m):	0.030303
End_Ring Resistivity (ohm.mm ² /m):	0.030303
Rotor Core Length (mm):	70
Rotor Stacking Factor	0.95
Rotor Steel Type	M800-50 A
Magnetic Shaft:	Yes
MATERIAL CONSUMPTION	
Armature Wire Density (kg/m ³):	8900
Auxiliary Wire Density (kg/m ³):	8900
Rotor Bar Density (kg/m ³):	8900
Rotor Ring Density (kg/m ³):	8900
Armature Core Steel Density (kg/m ³):	7800
Rotor Core Steel Density (kg/m ³):	7800
Main Winding Copper Weight (kg):	0.574968
Auxiliary Winding Copper Weight (kg):	0.553286
Adjust Winding Copper Weight (kg):	0
Rotor Bar Material Weight (kg):	0.568493
Rotor Ring Material Weight (kg):	0.802261
Armature Core Steel Weight (kg):	3.2148
Rotor Core Steel Weight (kg):	1.92786
Total Net Weight (kg):	7.64167
Armature Core Steel Consumption (kg):	6.85616
Rotor Core Steel Consumption (kg):	3.18729
RATED OPERATION	
Main-Phase Resistance (ohm):	2.41428
Main-Phase Resistance at 20C (ohm):	1.98594
Aux.-Phase Resistance (ohm):	6.12522

Aux.-Phase Resistance at 20C (ohm):	5.03849
Main Leakage Reactance (ohm):	2.96855
Aux. Leakage Reactance (ohm):	7.24743
Rotor Resistance (ohm):	1.53185
Rotor Leakage Reactance (ohm):	2.19469
Magnetizing Reactance (ohm):	28.2228
Turn Ratio of Aux. to Main-Coil:	1.5625
Stator Line Current (A):	8.54045
Main-Phase Current (A):	8.29364
Aux.-Phase Current (A):	4.81621
Phase Shift between Main and Aux. Currents (degrees):	106.746
Capacitor Voltage (V):	433.064
Capacitor Loss (W):	20.8572
Copper Loss of Stator Winding (W):	308.145
Copper Loss of Rotor Winding (W):	28.453
Iron-Core Loss (W):	90.2027
Frictional and Windage Loss (W):	21.7118
Total Loss (W):	469.37
Input Power (W):	1569.01
Output Power (W):	1099.64
Mechanical Shaft Torque (N.m):	7.15711
Efficiency (%):	70.085
Power Factor:	0.798763
Rated Slip:	0.021875
Rated Shaft Speed (rpm):	1467.19
NO-LOAD OPERATION	
Main Leakage Reactance (ohm):	2.84704
Aux. Leakage Reactance (ohm):	6.95078
Rotor Leakage Reactance (ohm):	2.10502
Magnetizing Reactance (ohm):	26.0132
No-Load Stator Line Current (A):	6.78294
No-Load Main-Phase Current (A):	9.6043
No-Load Aux.-Phase Current (A):	5.25681
Phase Shift between No-Load Main and Aux. Currents (degrees):	139.741
No-Load Iron-Core Loss (W):	98.1649
No-Load Input Power (W):	578.118
No-Load Power Factor:	0.370571
No-Load Slip:	0.000769043
No-Load Shaft Speed (rpm):	1498.85
BREAK-DOWN OPERATION	
Break-Down Slip:	0.13
Break-Down Torque (N.m):	18.5586
Break-Down Torque Ratio:	2.59304
LOCKED-ROTOR OPERATION	
Locked-Rotor Torque (N.m):	1.91236

Locked-Rotor Line Current (A):	35.3905
Locked-Rotor Torque Ratio:	0.267197
Locked-Rotor Current Ratio:	4.14387
Locked-Rotor Main-Phase Current (A):	37.3718
Locked-Rotor Aux.-Phase Current (A):	2.91072
Phase Shift between Locked-Rotor Main and Aux. Currents (degrees):	135.964
DETAILED DATA AT RATED OPERATION	
Main Slot Leakage Reactance (ohm):	0.933818
Main End-Winding Leakage Reactance (ohm):	0.482712
Main Differential Leakage Reactance (ohm):	1.55202
Aux. Slot Leakage Reactance (ohm):	2.27983
Aux. End-Winding Leakage Reactance (ohm):	1.1785
Aux. Differential Leakage Reactance (ohm):	3.78911
Rotor Slot Leakage Reactance (ohm):	0.9655
Rotor End-Winding Leakage Reactance (ohm):	0.0628876
Rotor Differential Leakage Reactance (ohm):	0.567052
Skewing Leakage Reactance (ohm):	0.599251
Main-Phase Winding Factor:	0.898056
Aux.-Phase Winding Factor:	0.898056
Angle Between Main & Aux. Winding Axes (degrees):	89.1229
Mutual Leakage Reactance (ohm):	-1.5105
Stator-Teeth Flux Density (Tesla):	1.86125
Rotor-Teeth Flux Density (Tesla):	1.98922
Stator-Yoke Flux Density (Tesla):	2.80358
Rotor-Yoke Flux Density (Tesla):	0.864216
Air-Gap Flux Density (Tesla):	1.04006
Stator-Teeth Ampere Turns (A.T):	111.131
Rotor-Teeth Ampere Turns (A.T):	151.712
Stator-Yoke Ampere Turns (A.T):	214.232
Rotor-Yoke Ampere Turns (A.T):	1.66835
Air-Gap Ampere Turns (A.T):	296.292
Correction Factor for Magnetic Circuit Length of Stator Yoke:	0.1
Correction Factor for Magnetic Circuit Length of Rotor Yoke:	0.7
Saturation Factor for Teeth:	1.88711
Saturation Factor for Teeth & Yoke:	2.61578
Induced-Voltage Factor:	0.875684
Mean Half-Turn Length of	

Main-Phase Winding (mm):	147.187
Mean Half-Turn Length of	
Aux.-Phase Winding (mm):	147.187
Harmonic Winding Factors:	
Harmonic Orders Main Aux.	
H1:	0.8981 0.8981
H3:	0.2940 0.2940
H5:	0.1724 0.1724
H7:	0.1250 0.1250
H9:	0.1111 0.1111
Main-Phase Slot Fill Factor (%):	75.9493
Aux.-Phase Slot Fill Factor (%):	74.1055
Main Winding Current Density (A/mm ²):	10.8839
Aux. Winding Current Density (A/mm ²):	10.2626
Specific Electric Loading (A/mm):	32.7901
Stator Thermal Load (A ² /mm ³):	347.192

WINDING ARRANGEMENT

The 2-phase, 1-layer winding can be arranged in 36 slots as below:

AAAAABBBBXXXXXXYYYYAAAAABBBBXXXXXXYYYY

Average coil pitch is:	6.77778
Angle per slot (elec. degrees):	20
Phase-A axis (elec. degrees):	125.439
First slot center (elec. degrees):	0

TRANSIENT FEA INPUT DATA

For Main Winding:

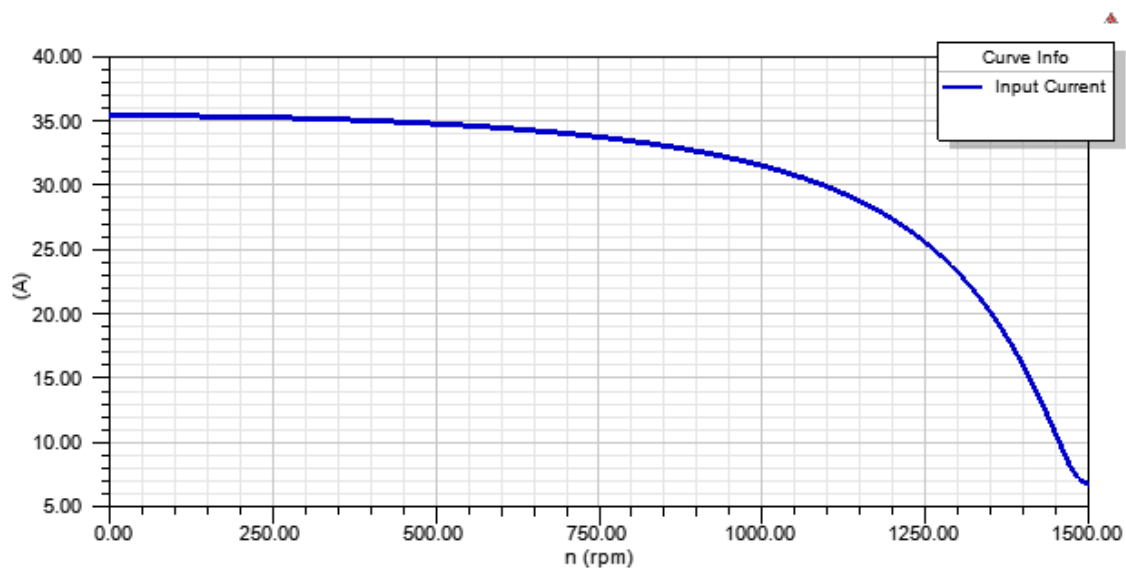
Number of Turns:	288
Parallel Branches:	1
Terminal Resistance (ohm):	2.41428
End Leakage Inductance (H):	0.00153652

For Aux. Winding:

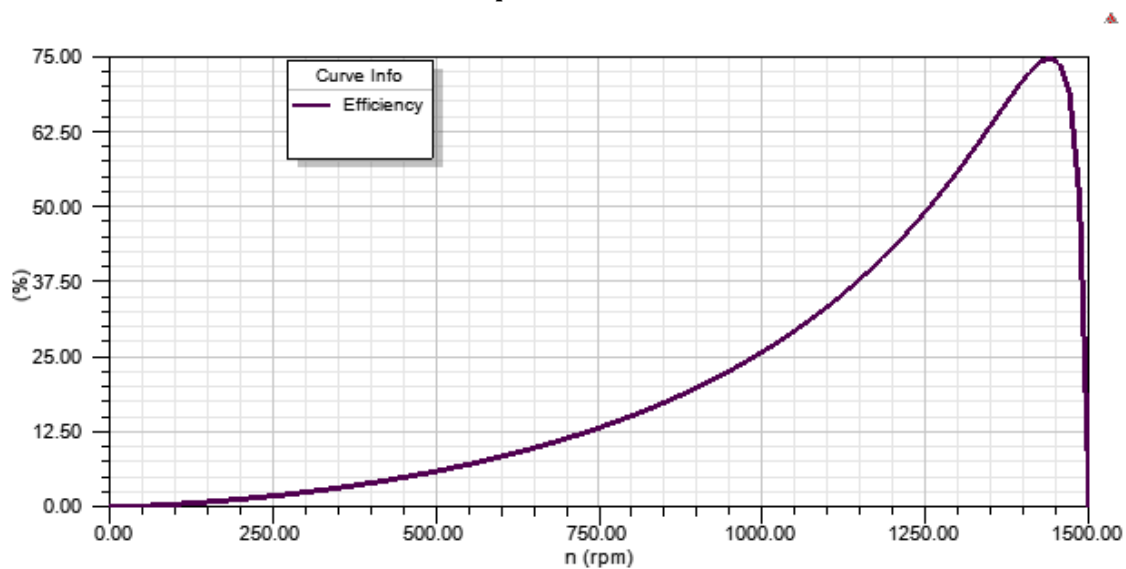
Number of Turns:	450
Parallel Branches:	1
Terminal Resistance (ohm):	6.12522
End Leakage Inductance (H):	0.00375127
Starting Capacitance (uF):	0
Running Capacitance (uF):	35.4
Switch Speed (rpm):	0

For Rotor End Ring Between Two Bars of One Side:

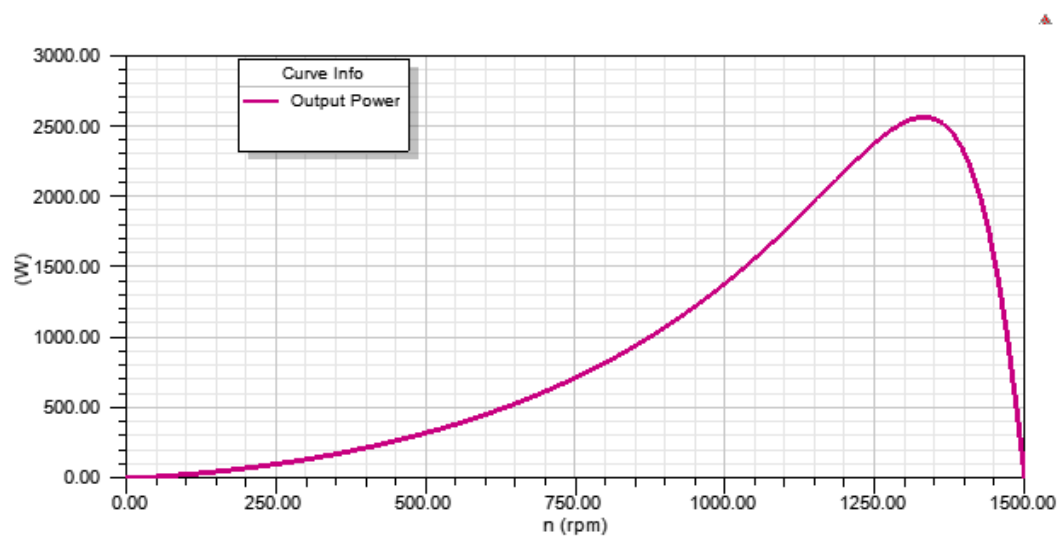
Equivalent Ring Resistance (ohm):	1.27102e-006
Equivalent Ring Inductance (H):	1.13685e-008
2D Equivalent Value:	
Equivalent Model Depth (mm):	70
Equivalent Stator Stacking Factor:	0.95
Equivalent Rotor Stacking Factor:	0.95
Estimated Rotor Moment of Inertia (kg m ²):	0.00320756



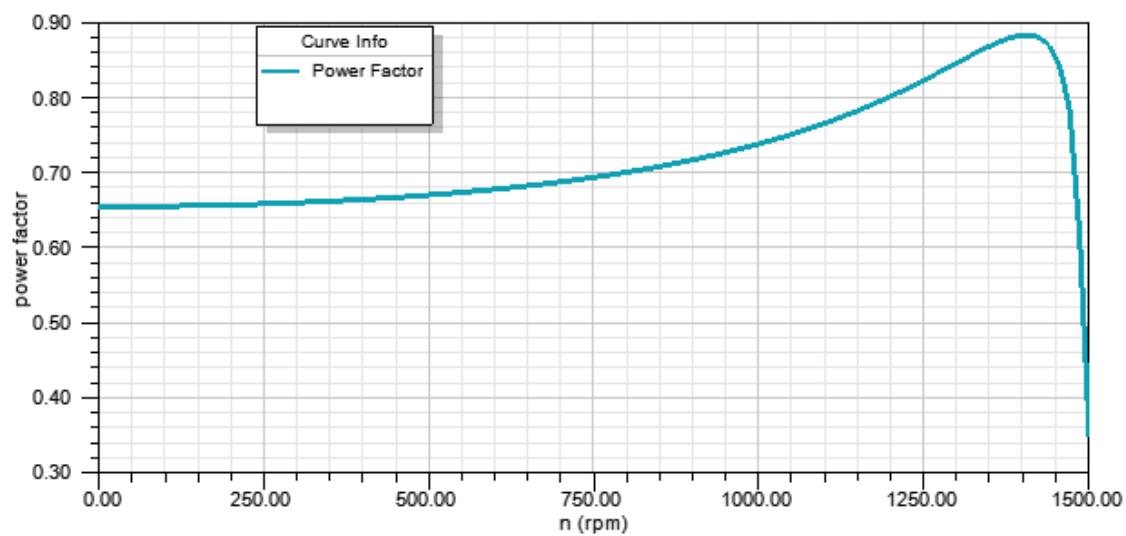
Obr. 42. Závislost proudu na otáčkách motoru B



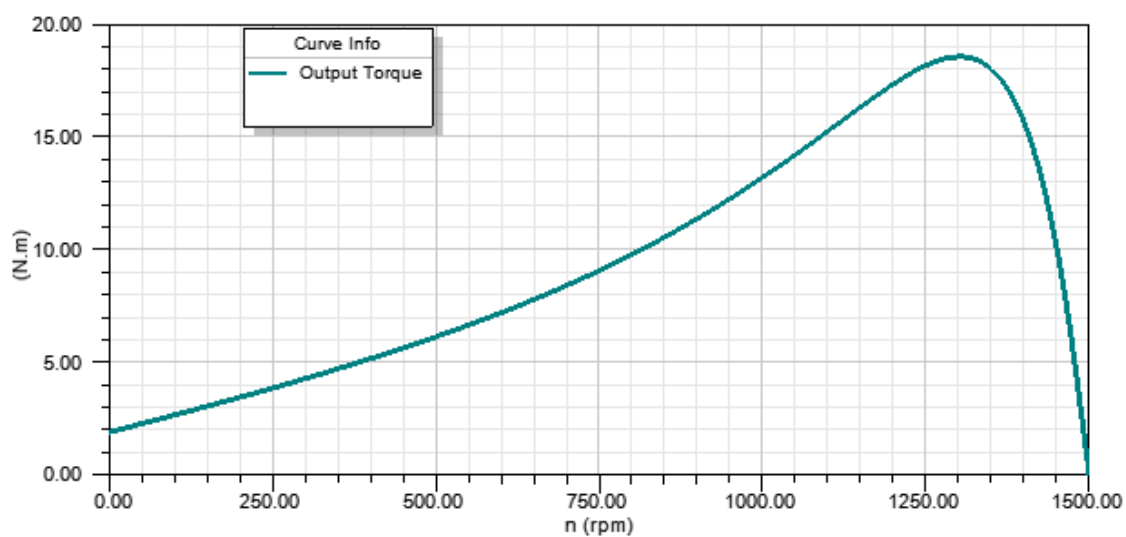
Obr. 43. Závislost účinnosti na otáčkách motoru B



Obr. 44. Závislost výkonu na otáčkách motoru B



Obr. 45. Závislost účinníku na otáčkách motoru B



Obr. 46. Momentová charakteristika motoru B

Příloha 3 Parametry motoru 1FL_01 (Zadaný motor C)

GENERAL DATA

Rated Output Power (kW):	1.1
Rated Voltage (V):	230
Number of Poles:	4
Frequency (Hz):	50
Rated Speed (rpm):	1420
Frictional Loss (W):	5
Windage Loss (W):	15
Type of Load:	Constant Power
Iron Core Length (mm):	70
Stacking Factor of Iron Core:	0.95
Type of Steel:	M800-50A_50Hz
Operating Temperature (C):	75
Rotor Position:	Inner
Operation mode:	Capacitor-Run Mode
Run Capacitance (uF):	30
& Its Resistance (ohm):	1.06103
Speed-Adjustment mode:	No Speed-Adjustment

STATOR DATA

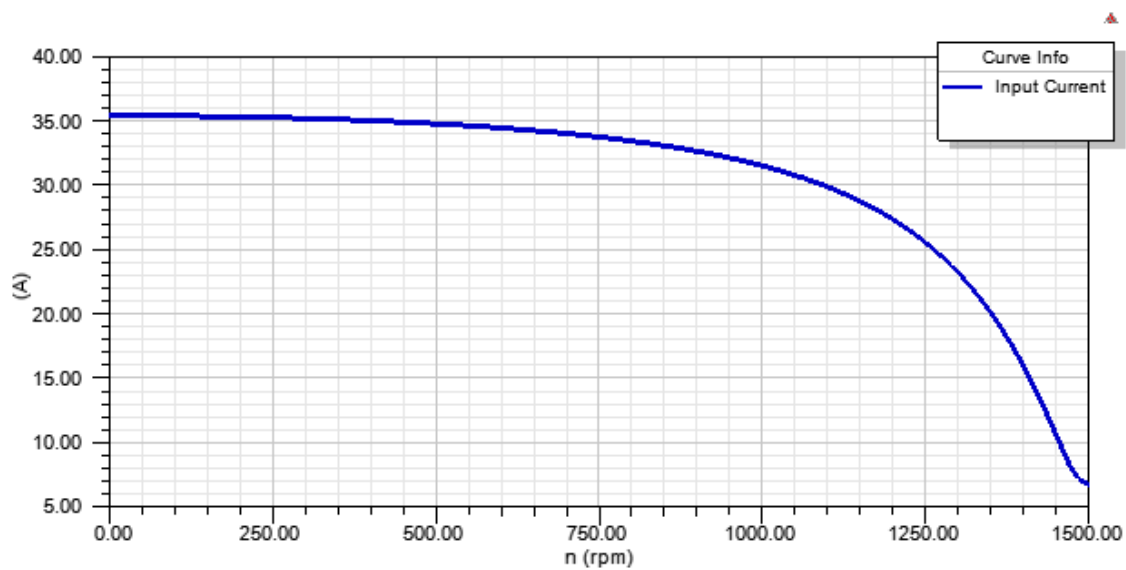
Number of Stator Slots:	36
Outer Diameter of Stator (mm):	135
Inner Diameter of Stator (mm):	82.5
Type of Stator Slot:	1
Stator Slot	
hs0 (mm):	0.8
hs2 (mm):	10.249
bs0 (mm):	2.5
bs1 (mm):	3.424
bs2 (mm):	5.34
Top Tooth Width (mm):	4.11944
Bottom Tooth Width (mm):	3.99725
Main Aux.	
Type of Coils:	11 11
Conductor Length Adjustment (mm):	0 0
Number of Parallel Branches:	1 1
Number of Wires per Conductor:	2 2
Number of Conductors per Slot	38 63
Main-Phase Wire Diameter (mm):	0.63
Aux.-Phase Wire Diameter (mm):	0.475
Main-Phase Wire Wrap (mm):	0.049
Aux.-Phase Wire Wrap (mm):	0.044
Designed Wedge Thickness (mm):	0.91358
Slot Insulation Thickness (mm):	0.3
Layer Insulation Thickness (mm):	0
Limited Slot Fill Factor (%):	75
Wire Resistivity (ohm.mm ² /m):	0.0217

Aux Wire Resistivity (ohm.mm ² /m):	0.0217
ROTOR DATA	
Number of Rotor Slots:	26
Air Gap (mm):	0.24
Inner Diameter of Rotor (mm):	28.5
Type of Rotor Slot:	1
Rotor Slot	
hs0 (mm):	0.475
hs2 (mm):	8.71
bs0 (mm):	0.8
bs1 (mm):	4.1
bs2 (mm):	2
Cast Rotor:	Yes
Number of Vents:	0
Vent Diameter (mm):	0
Vent Location (mm):	0
Skew Width:	1.01
End Length of Bar (mm):	0
Height of End Ring (mm):	19.25
Width of End Ring (mm):	11
Bar Resistivity (ohm.mm ² /m):	0.030303
End_Ring Resistivity (ohm.mm ² /m):	0.030303
Rotor Core Length (mm):	70
Rotor Stacking Factor	0.95
Rotor Steel Type	M800-50 A_50Hz
Magnetic Shaft:	Yes
MATERIAL CONSUMPTION	
Armature Wire Density (kg/m ³):	8900
Auxiliary Wire Density (kg/m ³):	8900
Rotor Bar Density (kg/m ³):	8900
Rotor Ring Density (kg/m ³):	8900
Armature Core Steel Density (kg/m ³):	7800
Rotor Core Steel Density (kg/m ³):	7800
Main Winding Copper Weight (kg):	0.542057
Auxiliary Winding Copper Weight (kg):	0.510868
Adjust Winding Copper Weight (kg):	0
Rotor Bar Material Weight (kg):	0.568493
Rotor Ring Material Weight (kg):	0.732019
Armature Core Steel Weight (kg):	3.49828
Rotor Core Steel Weight (kg):	1.93638
Total Net Weight (kg):	7.7881
Armature Core Steel Consumption (kg):	7.10535
Rotor Core Steel Consumption (kg):	2.77277
RATED OPERATION	
Main-Phase Resistance (ohm):	3.40027
Main-Phase Resistance at 20C (ohm):	2.79699
Aux.-Phase Resistance (ohm):	9.91663

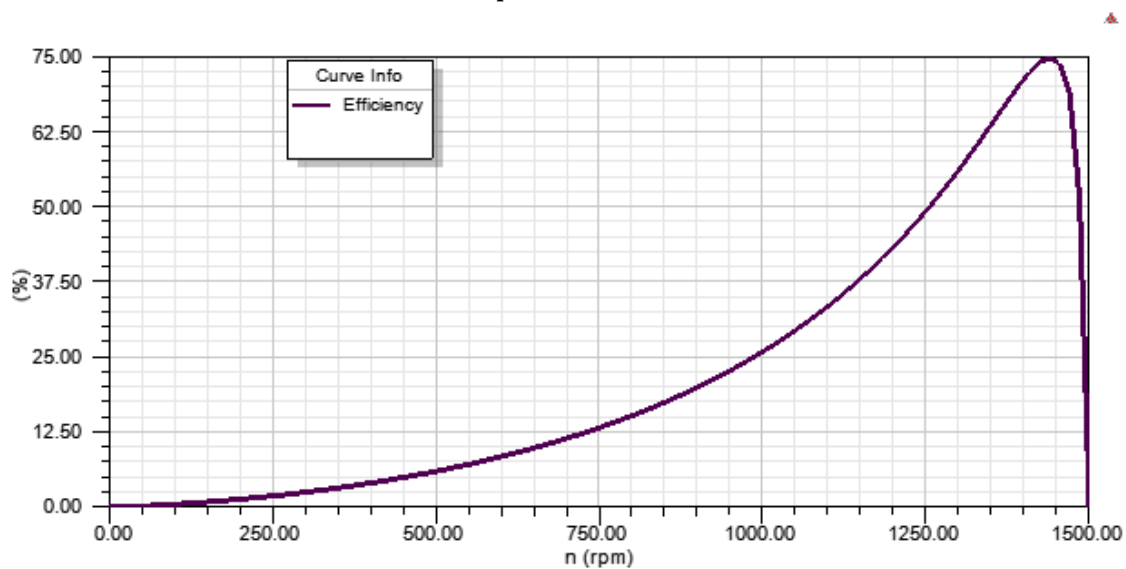
Aux.-Phase Resistance at 20C (ohm):	8.15722
Main Leakage Reactance (ohm):	4.13148
Aux. Leakage Reactance (ohm):	11.3558
Rotor Resistance (ohm):	2.13486
Rotor Leakage Reactance (ohm):	3.08566
Magnetizing Reactance (ohm):	39.7167
Turn Ratio of Aux. to Main-Coil:	1.65789
Stator Line Current (A):	6.93299
Main-Phase Current (A):	4.8965
Aux.-Phase Current (A):	4.42948
Phase Shift between Main and Aux. Currents (degrees):	86.9466
Capacitor Voltage (V):	469.983
Capacitor Loss (W):	20.8178
Copper Loss of Stator Winding (W):	276.091
Copper Loss of Rotor Winding (W):	39.1125
Iron-Core Loss (W):	57.7244
Frictional and Windage Loss (W):	21.3521
Total Loss (W):	415.098
Input Power (W):	1515
Output Power (W):	1099.9
Mechanical Shaft Torque (N.m):	7.20636
Efficiency (%):	72.6007
Power Factor:	0.950088
Rated Slip:	0.0283333
Rated Shaft Speed (rpm):	1457.5
NO-LOAD OPERATION	
Main Leakage Reactance (ohm):	3.83785
Aux. Leakage Reactance (ohm):	10.5488
Rotor Leakage Reactance (ohm):	2.86744
Magnetizing Reactance (ohm):	34.34
No-Load Stator Line Current (A):	3.96807
No-Load Main-Phase Current (A):	6.15229
No-Load Aux.-Phase Current (A):	4.9549
Phase Shift between No-Load Main and Aux. Currents (degrees):	142.505
No-Load Iron-Core Loss (W):	63.8941
No-Load Input Power (W):	525.135
No-Load Power Factor:	0.575393
No-Load Slip:	0.000940755
No-Load Shaft Speed (rpm):	1498.59
BREAK-DOWN OPERATION	
Break-Down Slip:	0.13
Break-Down Torque (N.m):	14.4316
Break-Down Torque Ratio:	2.00263
LOCKED-ROTOR OPERATION	
Locked-Rotor Torque (N.m):	1.90761

Locked-Rotor Line Current (A):	25.3105
Locked-Rotor Torque Ratio:	0.264713
Locked-Rotor Current Ratio:	3.65074
Locked-Rotor Main-Phase Current (A):	26.9337
Locked-Rotor Aux.-Phase Current (A):	2.57391
Phase Shift between Locked-Rotor Main and Aux. Currents (degrees):	132.568
DETAILED DATA AT RATED OPERATION	
Main Slot Leakage Reactance (ohm):	1.32031
Main End-Winding Leakage Reactance (ohm):	0.642217
Main Differential Leakage Reactance (ohm):	2.16895
Aux. Slot Leakage Reactance (ohm):	3.62901
Aux. End-Winding Leakage Reactance (ohm):	1.76521
Aux. Differential Leakage Reactance (ohm):	5.96162
Rotor Slot Leakage Reactance (ohm):	1.36141
Rotor End-Winding Leakage Reactance (ohm):	0.0830141
Rotor Differential Leakage Reactance (ohm):	0.797989
Skewing Leakage Reactance (ohm):	0.843245
Main-Phase Winding Factor:	0.898056
Aux.-Phase Winding Factor:	0.898056
Angle Between Main & Aux. Winding Axes (degrees):	89.1229
Mutual Leakage Reactance (ohm):	-2.25603
Stator-Teeth Flux Density (Tesla):	1.80136
Rotor-Teeth Flux Density (Tesla):	1.94305
Stator-Yoke Flux Density (Tesla):	1.94568
Rotor-Yoke Flux Density (Tesla):	0.817797
Air-Gap Flux Density (Tesla):	0.958012
Stator-Teeth Ampere Turns (A.T):	82.366
Rotor-Teeth Ampere Turns (A.T):	153.157
Stator-Yoke Ampere Turns (A.T):	158.27
Rotor-Yoke Ampere Turns (A.T):	1.4622
Air-Gap Ampere Turns (A.T):	271.95
Correction Factor for Magnetic Circuit Length of Stator Yoke:	0.224933
Correction Factor for Magnetic Circuit Length of Rotor Yoke:	0.7
Saturation Factor for Teeth:	1.86605
Saturation Factor for Teeth & Yoke:	2.45341
Induced-Voltage Factor:	0.891252
Mean Half-Turn Length of	

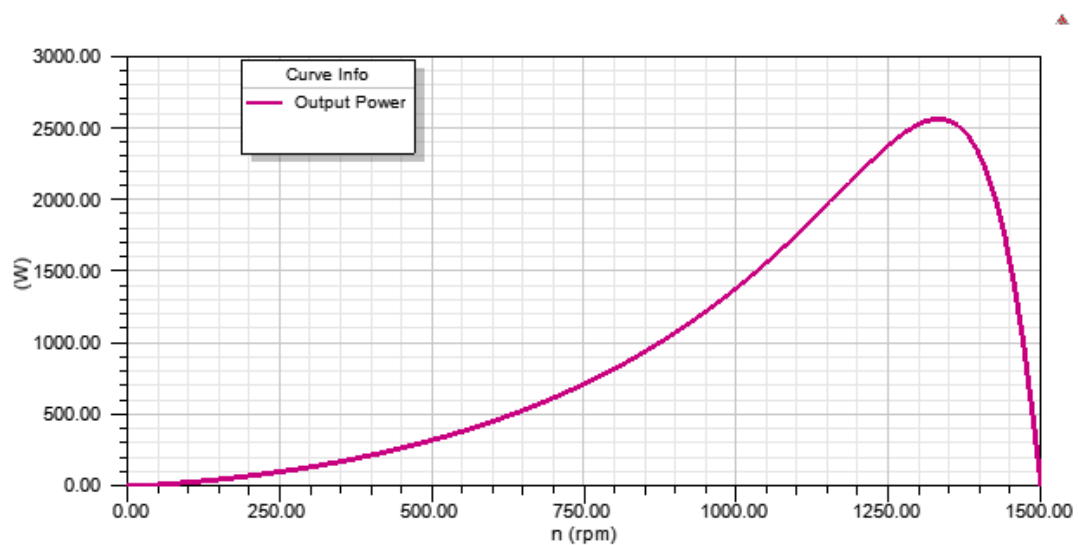
Main-Phase Winding (mm):	142.823
Mean Half-Turn Length of	
Aux.-Phase Winding (mm):	142.823
Harmonic Winding Factors:	
Harmonic Orders Main Aux.	
H1:	0.8981 0.8981
H3:	0.2940 0.2940
H5:	0.1724 0.1724
H7:	0.1250 0.1250
H9:	0.1111 0.1111
Main-Phase Slot Fill Factor (%):	75.9985
Aux.-Phase Slot Fill Factor (%):	73.6135
Main Winding Current Density (A/mm ²):	7.85389
Aux. Winding Current Density (A/mm ²):	12.4982
Specific Electric Loading (A/mm):	32.3026
Stator Thermal Load (A ² /mm ³):	343.709
WINDING ARRANGEMENT	
The 2-phase, 1-layer winding can be arranged in 36 slots as below:	
AAAAABBBBXXXXXXYYYYAAAAABBBBXXXXXXYYYY	
Average coil pitch is:	6.77778
Angle per slot (elec. degrees):	20
Phase-A axis (elec. degrees):	125.439
First slot center (elec. degrees):	0
TRANSIENT FEA INPUT DATA	
For Main Winding:	
Number of Turns:	342
Parallel Branches:	1
Terminal Resistance (ohm):	3.40027
End Leakage Inductance (H):	0.00204424
For Aux. Winding:	
Number of Turns:	567
Parallel Branches:	1
Terminal Resistance (ohm):	9.91663
End Leakage Inductance (H):	0.00561883
Starting Capacitance (uF):	0
Running Capacitance (uF):	30
Switch Speed (rpm):	0
For Rotor End Ring Between Two Bars of One Side:	
Equivalent Ring Resistance (ohm):	1.19441e-006
Equivalent Ring Inductance (H):	1.10052e-008
2D Equivalent Value:	
Equivalent Model Depth (mm):	70
Equivalent Stator Stacking Factor:	0.95
Equivalent Rotor Stacking Factor:	0.95
Estimated Rotor Moment of Inertia (kg m ²):	0.00242589



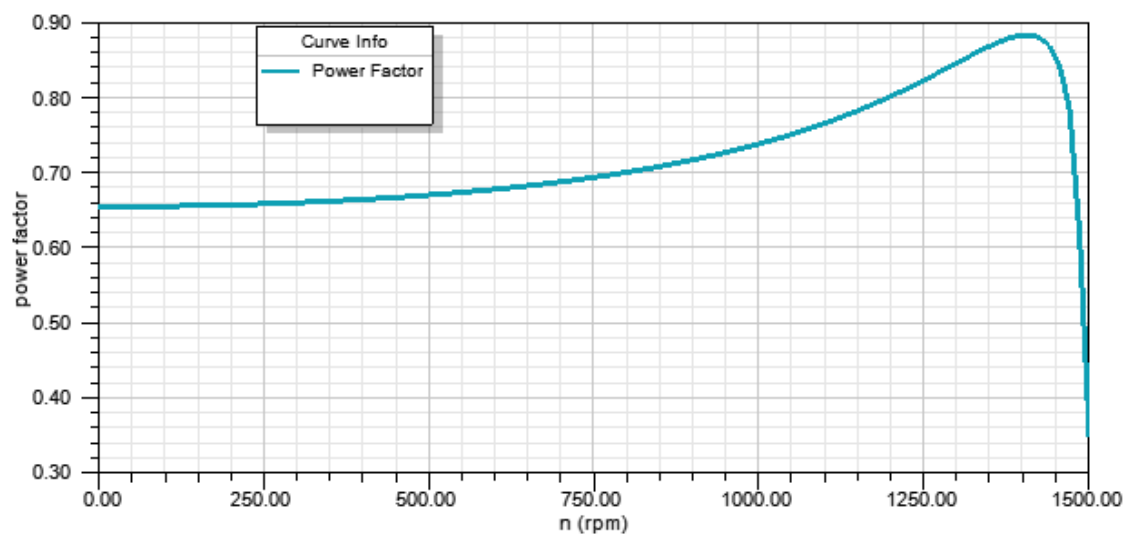
Obr. 47. Závislost proudu na otáčkách motoru C



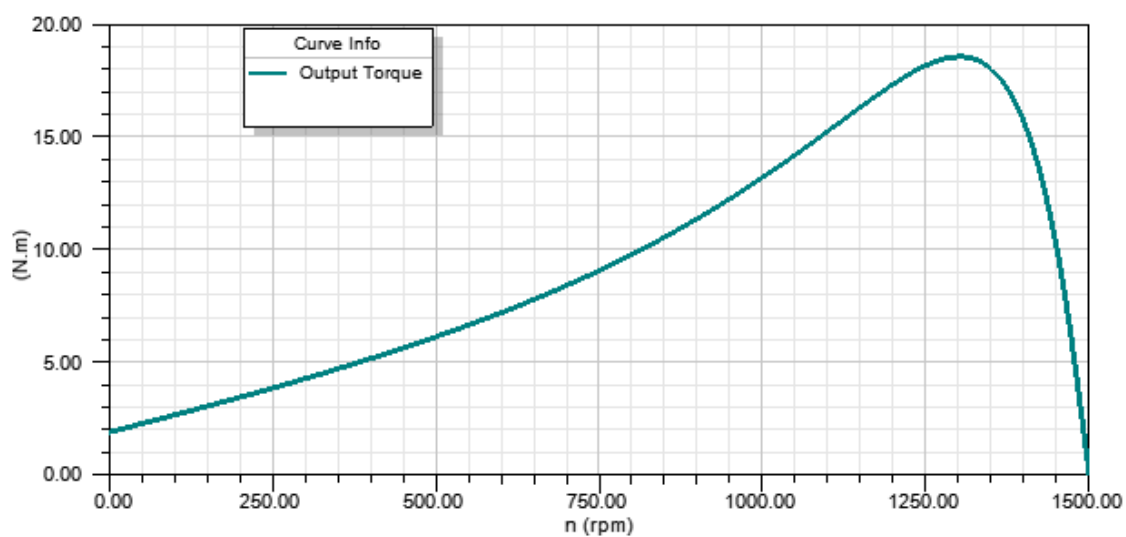
Obr. 48. Závislost účinnosti na otáčkách motoru C



Obr. 49. Závislost výkonu na otáčkách motoru C



Obr. 50. Závislost účinníku na otáčkách motoru C



Obr. 51. Momentová charakteristika motoru C